

مهندسی متالورژی و مواد

https://jmme.um.ac.ir/



تحلیل حساسیت زمان انحلال، دمای پیرسازی و افزودن نانوذرات خاک رس بر سختی آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیم پیستون به‌روش آنالیز رگرسیون*

مقاله پژوهشی

حامد بهمن‌آبادی(۱) محمد آزادی(۲)

DOI: 10.22067/jmme.2022.75681.1044

چکیده در این مقاله، به تحلیل حساسیت پارامترهای عملیات حرارتی شامل زمان انحلال، دمای پیرسازی و نیز افزودن نانوذرات بر سختی آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیم ($AlSi_{12}CuNiMg$) پیستون موتور خودرو به‌روش آنالیز رگرسیون پرداخته شده است. بدین‌منظور، از نانوذرات خاک رس به‌مقدار ۱ درصد وزنی جهت ساخت نانوکامپوزیت پایه‌فلزی، استفاده شده و نمونه‌های استاندارد، با روش ریخته‌گری گردابی و گرانشی ساخته شدند. به‌منظور یافتن شرایط بهینه عملیات حرارتی جهت دستیابی به بیشترین مقدار سختی، فرآیند انحلال با دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۱، ۳ و ۵ ساعت و نیز فرآیند پیر سازی با دماهای ۲۰۰، ۲۱۵ و ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ٦ ساعت برروی آلیاژ پایه و نیز نانوکامپوزیت پایه‌فلزی، اعمال گردید. نتایج تجربی نشان داد که دمای پیرسازی، پارامتری با بیشترین تأثیر و زمان انحلال و نیز افزودن نانوذرات، پارامترهایی با کمترین میزان تأثیر بر سختی آلیاژ بوده‌اند. همچنین، زمان ۵ ساعت برای فرآیند انحلال و دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد برای فرآیند پیرسازی، شرایط بهینه برای عملیات حرارتی بوده و موجب دستیابی به بیشترین میزان سختی شده‌اند.

واژه‌های کلیدی آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیم، آنالیز رگرسیون، پیستون موتور، عملیات حرارتی، نانوذرات رس.

Sensitivity Analysis of Solutioning Time, Ageing Temperature, and Clay Nano-Particles Addition on Hardness of Piston Aluminum-Silicon Alloy using Regression Analysis

Hamed Bahmanabadi Mohammad Azadi

Abstract
In this article, the sensitivity analysis of heat treatment parameters including the solutioning time, ageing temperature, and addition of nano-particles on the hardness of the piston aluminum-silicon alloy (AlSi12CuNiMg) were characterized using regression analysis method. For such an objective, the clay nano-particles with 1 wt.% were used to fabricate the metal-matrix nano-composites and the standard specimens were produced using the gravity and stir-casting methods. To find the superior heat treatment conditions for aiming the maximum hardness, the solution treatment was performed at 500℃ for 1, 3, and 5 hours and the ageing treatment was done at 200, 215, and 230℃ for 6 hours on the base alloy and the metal-matrix nano-composites. Experimental results showed that the ageing treatment had the most effect on the material hardness and the solutioning time and nano-particles addition were the less effective parameters on the alloy hardness. The optimum heat treatment conditions achieved by the solutioning time of 5 hours and the ageing temperature of 200 ℃, during heat-treating which led to have the maximum hardness.

Key Words: Aluminum-silicon alloy, Regression analysis, Engine piston, Heat treatment, Clay nano-particles

* تاریخ دریافت مقاله ۱٤۰۰/۱۲/۱۵ و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۱/۱۰/۰٤ می‌باشد.

(۱) دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان.

(۲) نویسندهٔ مسئول، دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان.

Email: m_azadi@semnan.ac.ir

مقدمه

پیستون، یکی از حساس‌ترین قطعات موتور خودرو است که در زمان عملکرد، تحت بارهای حرارتی و مکانیکی شدیدی قرار دارد [1]. باتوجه‌به نیروهای تراکمی و انبساطی ناشی از احتراق، تا ۱۸۰۰۰ نیوتن نیرو به پیستون وارد می‌شود که درهنگام رانندگی با سرعت زیاد، این اتفاق در هر سیلندر، سی تا چهل بار در ثانیه رخ می‌دهد [2]. پیستون‌ها به‌دلیل قرار داشتن در محفظه احتراق، تماس با سوخت، حرکت دائمی در سیلندرها، قرار داشتن در معرض فشار زیاد احتراق و زمان کارکرد بالا، باید خواص خستگی، خوردگی و سایشی مناسبی داشته و از سختی مناسبی نیز برخوردار باشند [3]. بدین‌منظور، به‌جهت افزایش عمر پیستون‌ها، باید خواص مکانیکی و خستگی آن‌ها را به شیوه‌های مختلف بهبود بخشید که ازجمله آن‌ها می‌توان به اصلاح روش‌های ساخت، افزودن عناصر در ابعاد میکرو و نانو به آلیاژ پایه، عملیات حرارتی و نیز پوشش‌دهی اشاره نمود. در ادامه، به‌طور اجمالی به ارائه برخی از پژوهش‌ها در زمینه بهبود خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم، پرداخته شده است.

محمدی گنگرج و همکاران [4]، اثر عملیات حرارتی و شرایط خنک‌سازی را بر فرآیند اصطکاکی کامپوزیت پایه-آلومینیومی A390 حاوی مقدار ۱۰ درصد وزنی SiC، موردبررسی قرار دادند. براساس نتایج، افزودن ذرات تقویتی SiC و نیز اجرای عملیات حرارتی سه‌مرحله‌ای، موجب افزایش تنش کششی نهایی و سختی آلیاژ A390 گردید. آلفونز (Alphonse) و همکاران [5]، به مطالعه اثر عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم AA2219 فورج‌شده، پرداختند. نتایج نشان داد که مقاومت کششی درنتیجه عملیات حرارتی افزایش یافته و نیز افزایش دمای پیرسازی موجب افزایش مقاومت کششی آلیاژ گردیده است. آزادی و همکاران [6]، به بررسی اثر عملیات حرارتی با فرآیندهای پیرسازی متفاوت، بر ریزساختار و سختی آلیاژ آلومینیوم پیستون پرداختند. نتایج نشان داد که ۷ ساعت انحلال در دمای ۵۱۵ درجه سانتی‌گراد و ۷ ساعت پیرسازی در دمای ۲۰۵ درجه سانتی‌گراد، موجب افزایش سختی آلیاژ پیستون تا مقدار بیشینه خود یعنی ۱۵۳ برینل گردید. راجکرتی (Rajkeerthi) و همکاران [7]، به ارزیابی اثر عملیات حرارتی بر مقاومت کامپوزیت پایه‌فلزی آلومینیوم پرداختند. براساس نتایج ارائه‌شده، عملیات حرارتی، موجب بهبود خواص کششی، فشاری و سختی این آلیاژ گردید. سفربالی و همکاران [8]، اثر عملیات حرارتی T4 و T6 را به‌ترتیب بر خواص اتصالی آلیاژهای دارای جوش اصطکاکی آلومینیوم ۲۰۲٤ و ۷۰۷۵ بررسی نمودند. نتایج حاکی از بهبود خواص مکانیکی هردو آلیاژ و بهبود چشمگیر آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ درنتیجه عملیات حرارتی T6 بود. یوان و همکاران [9]، به پژوهش برروی اثر عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی کامپوزیت پایه‌آلومینیومی تقویت‌شده با ذرات آلیاژی انتروپی‌بالا پرداختند. آن‌ها گزارش کردند که سختی و مدول الاستیسیته کامپوزیت، به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. پاداپ (Padap) و همکاران [10]، اثر فرآیند پیرسازی و فشار تک‌محوره را بر خواص دمایی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵، موردبررسی قرار دادند. افزایش سختی، بهبود خواص رسانایی گرمایی و ضریب انبساط حرارتی، ازجمله نتایج به‌دست‌آمده درنتیجه عملیات حرارتی اجراشده بود. آزادی و همکاران [11]، به بررسی اثر عملیات حرارتی و افزودن نانوذرات رس بر خواص کششی و خستگی کم‌چرخه آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیم پیستون موتور خودرو در دمای بالا پرداختند. براساس نتایج، تغییرات چشمگیری در خواص مکانیکی آلیاژ تقویت‌شده با نانوذرات و عملیات حرارتی شامل تنش کششی نهایی، تنش تسلیم و مدول الاستیسیته مشاهده نشده و فقط تغییر طول نمونه تقویت‌شده، افزایش یافت. یی (Yi) و همکاران [12]، به تحقیق درمورد اثر عملیات حرارتی T6 پس از جوش‌کاری، بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصالات جوش‌کاری آلیاژ آلومینیوم ٦۰٦۱، پرداختند. آنان دریافتند که ریزساختار نسبت به زمان و دمای عملیات حرارتی حساس بوده و نیز افزایش دما، یک عامل مفید در راستای کاهش زمان پیرسازی بوده است. آزادی و همکاران [13]، خواص فشاری و سایشی آلیاژ تقویت‌شده آلومینیوم با نانوذرات سیلیسیم اکسید را پس از عملیات حرارتی، بررسی نمودند. نتایج آزمون سایش نشان داد که نرخ سایش نانوکامپوزیت نسبت به آلیاژ پایه، کمتر بوده و نیز مدول الاستیسیته آلیاژ درنتیجه افزودن نانوذرات، افزایش یافته است. پراکاش (Prakash) و همکاران [14]، به پژوهش درمورد اثر عملیات حرارتی بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲٤ جوش‌کاری‌شده، پرداختند. براساس نتایج، خواص کششی و سختی این آلیاژ، درنتیجه عملیات حرارتی، بهبود یافت. آزادی و همکاران [15]، اثر عملیات حرارتی و افزودن نانوذرات رس را بر خواص مکانیکی

و رفتار خستگی کم‌چرخه تنش- کنترل آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیم، بررسی کردند. نتایج، عدم تأثیر مثبت نانوذرات رس و عملیات حرارتی را بر خواص مکانیکی آلیاژ، نشان داد. شریفی و همکاران [16]، به تحلیل حساسیت متغیرهای عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم سرسیلندر، به‌روش رگرسیون، پرداختند. نتایج تحلیل رگرسیون نشان داد که زمان پیرسازی مؤثرتر از دما بوده و دمای انحلال عامل مهم‌تری نسبت به دمای پیرسازی در تغییرات سختی بوده است.

با بررسی مقالات مختلف، می‌توان دریافت که پژوهش‌های بسیاری در زمینه برر سی اثر انواع مختلف عملیات حرارتی، اثر شرایط خنک‌سازی عملیات حرارتی، اثر عملیات حرارتی با دماهای مختلف فرآیند پیرسازی و اثر هم‌زمان عملیات حرارتی و افزودن نانوذرات، بر خواص مکانیکی آلیاژ های آلومینیوم و نیز نانوکامپوزیت پایه‌فلزی آلومینیوم انجام شده است. اما پژوهش در زمینه بررسی اثر هم‌زمان استفاده از نانوذرات رس و نیز عملیات حرارتی با شرایط مختلف دمایی و زمانی فرآیندهای انحلال و پیرسازی بر سختی آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیم، به‌ندرت یافت می‌شود که می‌توان از آن به‌عنوان نوآوری این پژوهش، یاد نمود.

در این پژوهش، به‌منظور بررسی شرایط مختلف عملیات حرارتی T6 و اثرات آن بر سختی آلیاژ آلومینیوم و نیز نانوکامپوزیت پایه‌فلزی آلومینیوم، از تحلیل حساسیت به‌روش رگرسیون استفاده شده است. تحلیل رگرسیون شامل روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی توابع هدف براساس متغیرهای ورودی است. در این روش، متغیرها می‌توانند به‌صورت متغیرهای خاص و منحصربه‌فرد یا به‌صورت متغیر وابسته و یک یا چند متغیر مستقل تعریف شوند. تحلیل رگرسیون، به‌طور ویژه مشخص می‌کند که هر متغیر چگونه و به چه میزان در تابع هدف اثرگذار است. همچنین، تغییر یکی از متغیرها چه اثری و با چه مقدار بر متغیرهای دیگر داشته و این تغییر چه تأثیری بر تابع هدف نهایی خواهد داشت. تحلیل رگرسیون، توانایی مناسبی در ارائه پیش‌بینی از رفتار ماده دارد [17]. پس از به‌دست آوردن اطلاعات حاصل از آزمون‌های تجربی، تحلیل صحیح و استفاده مناسب از نتایج به‌دست‌آمده، از مهمترین بخش‌های پژوهش است. با روش طراحی آزمون‌ها، می‌توان به میزان تأثیر هریک از متغیرها بر نتیجه آزمون دست یافت. همچنین، به‌کمک این روش، می‌توان حالت‌های بهینه آزمون‌های مختلف را تعیین نمود. روش مورداستفاده در این پژوهش، تحلیل حساسیت با استفاده از تحلیل‌های آماری است. در این روش، ابتدا باید میانگین مربعات اثر شامل متغیر مدنظر ($MS_{treatment}$) و خطا (MS_{error}) اندازه‌گیری شود. هدف نهایی در این روش، به‌دست آوردن حساسیت اثر باتوجه‌به روابط (۱) و (۲) است. درنهایت، مقدار به‌دست‌آمده با مقدار مرجع ($F_{a,a-1,N-a}$) مقایسه می‌گردد [17].

$$F_0 = \frac{MS_{treatment}}{Ms_{error}} \quad (۱)$$

$$F_0 > F_{a,a-1,N-a} \quad (۲)$$

برای مشخص شدن مقدار $F_{a,a-1,N-a}$ باید از جدول‌های آماری استفاده شود. در این پژوهش، مقدار سطح ریسک a برابر با ۰٫۰۵ و ضریب اطمینان طراحی آزمون‌ها برابر با ۹۵ درصد درنظر گرفته شده است. مقادیر $a-1$ و $N-a$ نیز نشان‌دهنده درجه آزادی اثر و خطا هستند. روابط (۱) و (۲) برای یک اثر، قابل‌اجرا هستند. شایان ذکر است که این روابط، قابلیت گسترش برای بررسی چندین اثر را دارند [17]. در این پژوهش، کلیه تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار تحلیل آماری Design-Expert انجام شده است. پس از تحلیل حساسیت با استفاده از تحلیل رگرسیون، مطابق رابطه (۳)، تابعی براساس متغیرهای مدنظر ($P_1, P_2, ...$) برای تخمین میزان سختی ارائه شده است.

$$H = C_0 + C_1P_1 + C_2P_2 + C_3P_1P_2 + \cdots \quad (۳)$$

پس از تطبیق رابطه فوق با نتایج تجربی به‌دست‌آمده، ضرایب رابطه (۳) شامل $C_0, C_1, ...$ به‌دست خواهند آمد. در این مقاله، ضریب ثابت، توان اول و دوم و نیز اثرات متقابل آن‌ها، درنظر گرفته شده است.

ذکر این نکته حائز اهمیت است که در تحلیل رگرسیون، اثرگذاری یا عدم اثرگذاری هر پارامتر، با P-value و نیز میزان اثرگذاری هر پارامتر، با F-value تعیین می‌شود. اگر مقدار P-value کمتر از ۰٫۰۵ باشد، پارامتر موردنظر، اثرگذار بوده و اگر مقدار آن بیشتر از ۰٫۰۵ باشد، پارامتر، بی‌اثر خواهد بود [18]. شایان ذکر است که مقادیر بزرگتر برای F-value بیانگر میزان اثرگذاری بیشتر پارامتر موردنظر است.

مواد و آزمون‌ها

در این مقاله، به تحلیل حساسیت پارامترهای عملیات حرارتی بر سختی آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیم و نیز نانوکامپوزیت پایه‌فلزی آلومینیوم پیستون موتور خودرو، پرداخته شده است. ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم مورداستفاده، در جدول (۱) ارائه شده

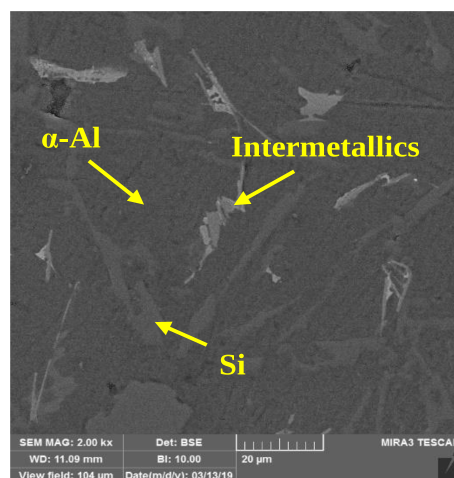
است. به‌منظور ساخت نانوکامپوزیت پایه‌فلزی آلومینیوم، مقدار ۱ درصد وزنی نانوذرات رس (Montmorillonite K 10) با روش ریخته‌گری گردابی، به آلیاژ پایه افزوده شد. ترکیب شیمیایی نانوذرات رس مورداستفاده در جدول (۲) قابل‌مشاهده است. جزئیات بیشتر درمورد نحوه ساخت نمونه‌ها، در پژوهش پیشین [19] ارائه شده است. شکل (۱)، تصویر میکروسوپ الکترونی نشر میدانی و طیف نمایی اشعه ایکس را از سطح آلیاژ آلومینیوم– سیلیسیم نشان می‌دهد.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم– سیلیسیم مورداستفاده

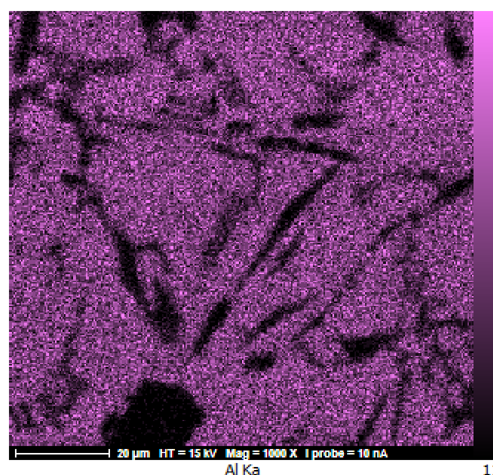
عنصر	آلومینیوم	سیلیسیم	مس	منیزیم	نیکل	آهن	روی	منگنز
مقدار (درصد وزنی)	۸۳٫۳۰	۱۲٫۷۰	۱٫۱٦	۱٫۰۰	۰٫۸۰	۰٫۵٦	۰٫۱٦	۰٫۱۲

جدول ۲ ترکیب شیمیایی نانوذرات رس مورداستفاده

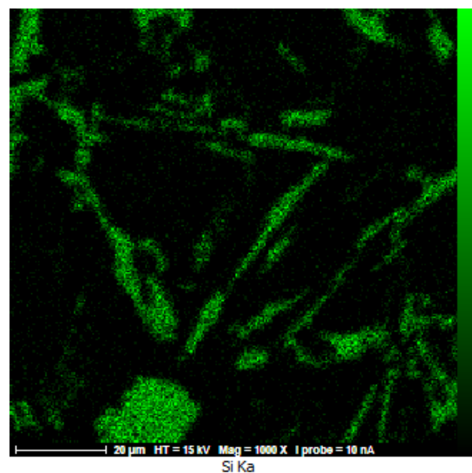
ترکیب	سیلیسیم اکسید	آلومینیوم اکسید	آهن اکسید	منیزیم اکسید	کلسیم اکسید	سدیم اکسید	پتاسیم اکسید	تیتانیم اکسید	سایر
مقدار (درصد)	۵۰٫۹۵	۱۹٫٦۰	۵٫٦۲	۳٫۲۹	۱٫۹۷	۰٫۹۸	۰٫۸٦	۰٫٦۲	۱۵٫٤٥



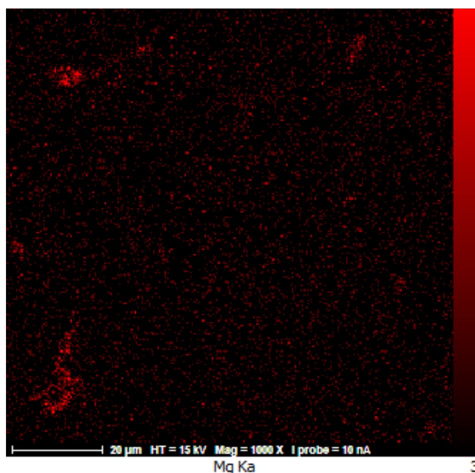
(الف)



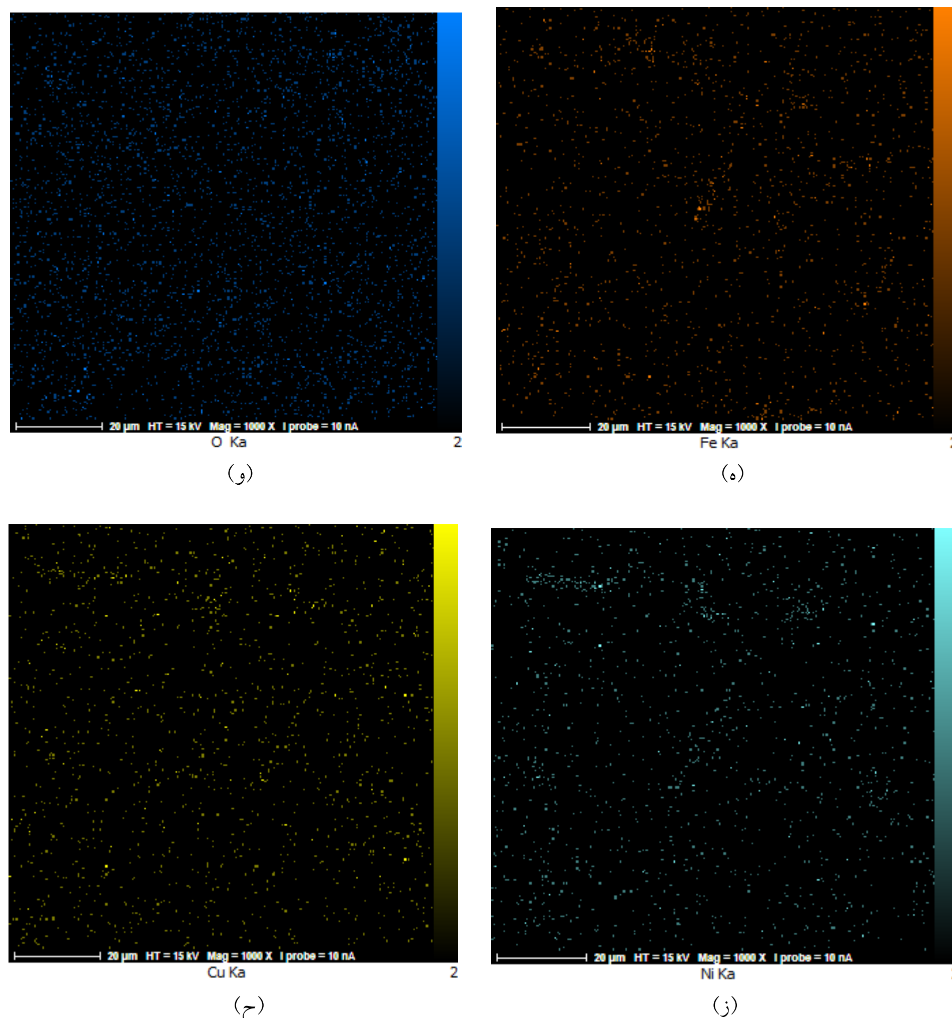
(ب)



(ج)



(د)

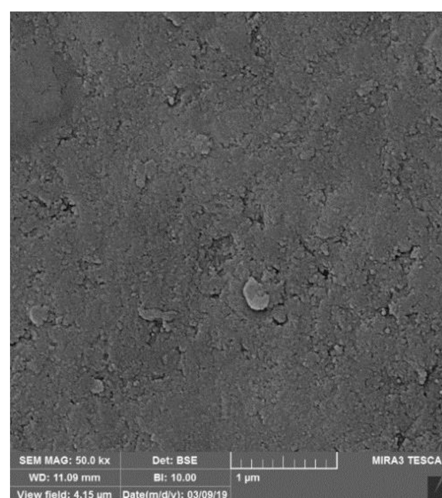


شکل ۱ (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی نشر میدانی از سطح آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیم، (ب) توزیع عنصر آلومینیوم، (ج) توزیع عنصر سیلیسیم، (د) توزیع عنصر منیزیم، (هـ) توزیع عنصر آهن، (و) توزیع عنصر اکسیژن، (ز) توزیع عنصر نیکل و (ح) توزیع عنصر مس

به‌منظور بررسی اثر توزیع یکنواخت و عدم انباشتگی نانوذرات رس در سطح نمونه، تصویر میکروسکوپ الکترونی نشر میدانی و طیف نمایی اشعه ایکس از سطح نانوکامپوزیت پایه‌فلزی آلومینیوم نیز در شکل (۲) ارائه شده است. شایان ذکر است که به‌منظور افزایش وضوح تصویر، سطح نمونه با لایه‌ای از طلا به ضخامت ۲۰ میکرومتر، پوشش داده شده است. در شکل (۱) و (۲)، فاز زمینه (آلومینیوم)، ذرات سیلیسیم و نیز ذرات بین‌فلزی شامل عناصر منیزیم، نیکل، آهن، منگنز، روی و مس قابل‌مشاهده است [19]. همچنین، واضح است که در سطح نانوکامپوزیت پایه‌فلزی، اثری از انباشتگی نانوذرات وجود نداشته و درنتیجه، توزیع، یکنواخت بوده است. وجود ذرات بین‌فلزی شامل عناصر سیلیسیم، آهن، مس و نیکل، موجب بهبود خواص مکانیکی آلیاژ علی‌الخصوص در دماهای بالا می‌گردد [20,21]. اتصال ذرات بین‌فلزی به فاز زمینه به‌دلیل مکانیزم مقاومتی، برای خواص مکانیکی یک مزیت محسوب می‌شود [22]. ذرات سیلیسیم و نیز ذرات بین‌فلزی دارای مدول الاستیسیته و سختی بالاتری هستند که تأثیر چشمگیری بر خواص مکانیکی مخصوصا در دماهای بالا دارند [23,24]. ذرات بین‌فلزی به‌دلیل پایداری دمایی و خواص مکانیکی مناسب‌تر، اثر بیشتری بر خواص دمابالای آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیم پیستون دارند [25,26]. تغییر اندازه و مورفولوژی سیلیسیم یوتکتیک، اثر چشمگیری بر خواص مکانیکی دارد [22]. وجود عنصر نیکل در فاز بین‌فلزی سبب افزایش سختی آلیاژ می‌گردد [27]. افزایش سختی آلیاژ درنتیجه افزایش مقادیر سیلیسیم و نیکل در آلیاژ به‌دلیل بیشتر بودن تنش تسلیم نیکل در فاز بین‌فلزی است [27]. به‌طور کل، وجود عنصر نیکل در آلیاژ ریختگی آلومینیوم- سیلیسیم با مقادیر بالای عنصر

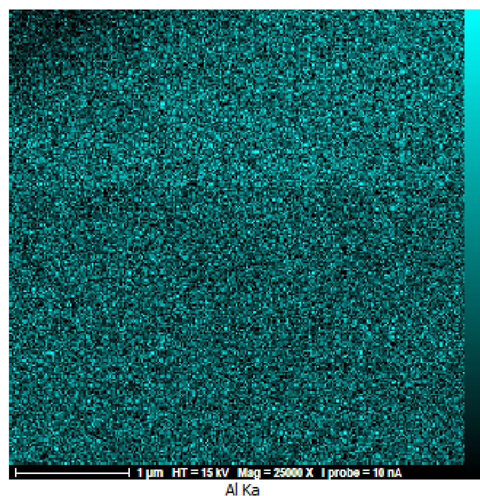
آهن، موجب بهبود خواص مکانیکی می‌گردد [27]. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، به‌منظور اجرای فرآیندهای عملیات حرارتی، قطعات کوچکی از استوانه ریخته‌گری‌شده، برش خورده و آماده اجرای فرآیند شد. شکل (۳)، مراحل مختلف ساخت تا سختی‌سنجی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. باتوجه‌به اینکه عملیات حرارتی T6 موجب افزایش سختی آلیاژ آلومینیوم می‌شود [28]، در این پژوهش پس از مطالعه مراجع مختلف [37-29], [6] و با بررسی‌های صورت‌گرفته در زمینه کاربرد صنعتی این آلیاژ، شرایط مختلفی از انحلال و پیرسازی جهت آزمایش، انتخاب گردید که جزئیات آن، در جدول (۳)، ارائه شده است. شایان ذکر است که عملیات حرارتی اجراشده برروی آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیم و نیز نانوکامپوزیت پایه‌فلزی، شامل ۱، ۳ و ۵ ساعت انحلال در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و خنک‌سازی در آب و ٦ ساعت پیرسازی در دماهای ۲۰۰، ۲۱۵ و ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد و خنک‌سازی در هوا بوده است. براساس نتایج ارائه‌شده در مرجع [38]، دمای خنک‌سازی و زمان پیرسازی، اثر چشمگیری بر سختی ندارند.

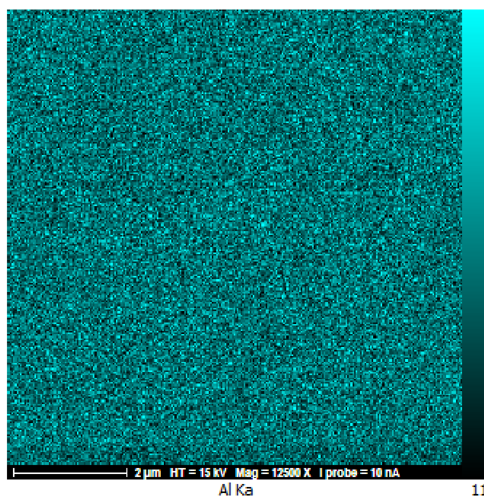
عملیات حرارتی، معمولا موجب افزایش کرنش شـــکســـت نمونه و نیز تغییر در شـــکل و اندازه ذرات بین‌فلزی می‌شـــود [38,39]. عملیات حرارتی T6، موجب بهبود ریزساختار، افزایش مقاومت کششی و عمر خستگی دمابالای آلیاژ آلومینیوم می‌گردد [40]. براساس گزارش‌های ارائه‌شده در مرجع [41]، مواد پس از عملیات حرارتی T6، سختی بی شتری نـ سبت به سایر عملیات حرارتی (T4، T5، T7، T8 و T9) داشـــتـه ند. پس از اجرای عملیات حرارتی با شرایط مختلف انحلال و پیر سازی، نمونه‌ها تحت آزمون سختی‌سنجی قرار گرفتند.



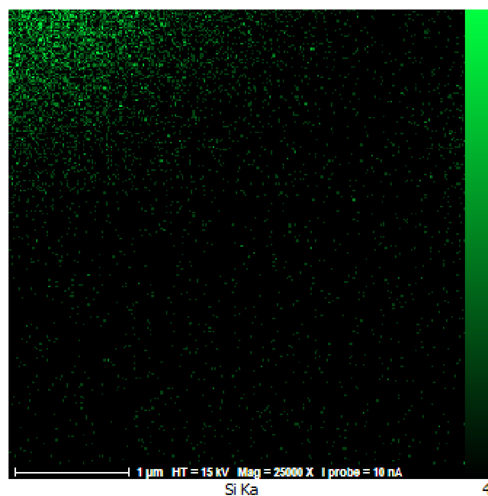


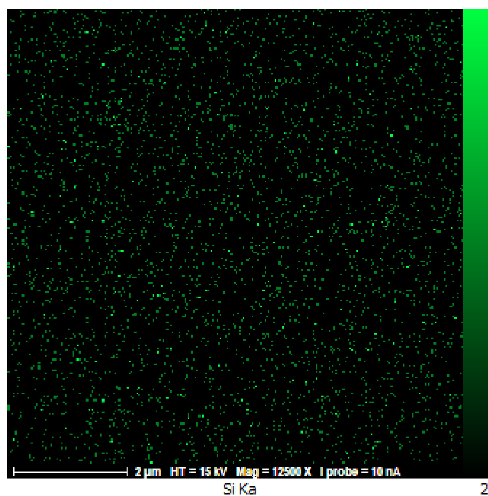
(الف)



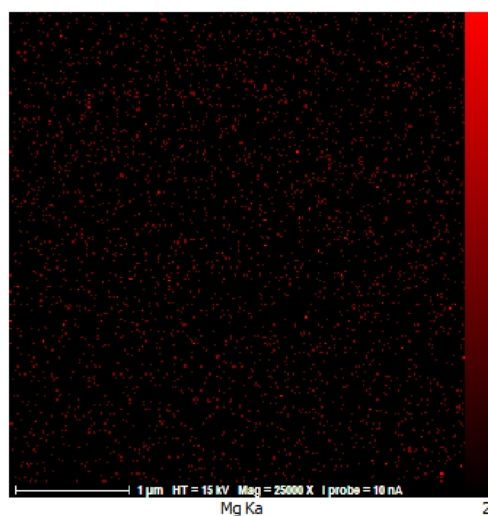


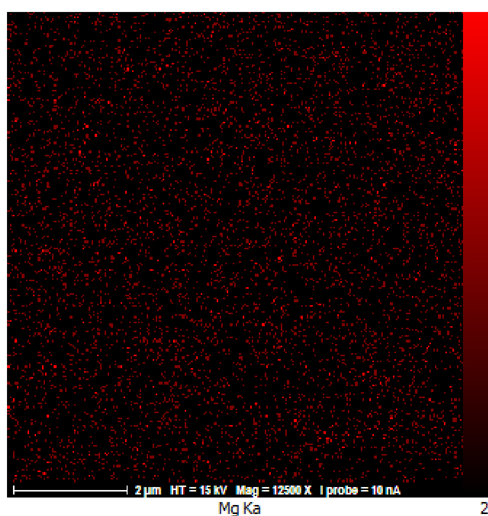
(ب)


1 µm HT = 15 kV Mag = 25000 X I probe = 10 nA
Si Ka
4

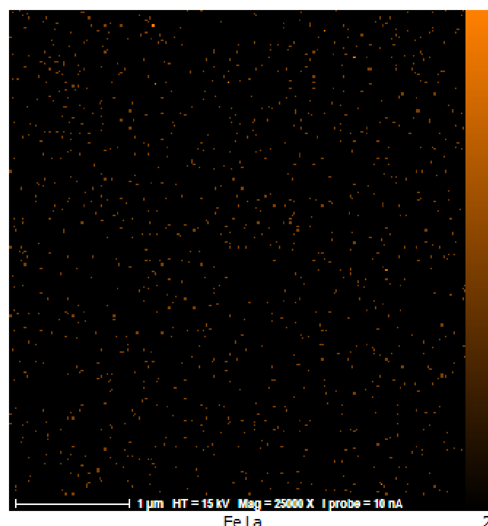

2 µm HT = 15 kV Mag = 12500 X I probe = 10 nA
Si Ka
2

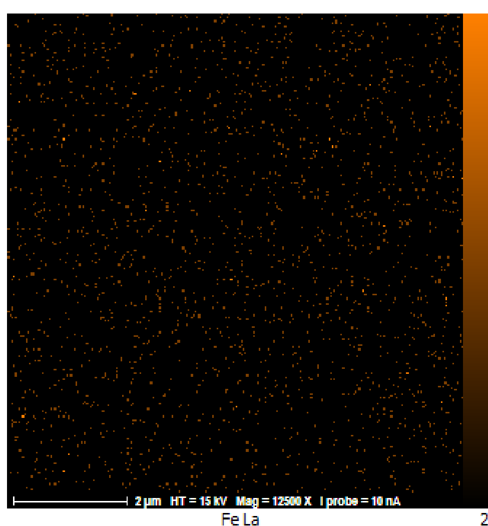
(ج)


1 µm HT = 15 kV Mag = 25000 X I probe = 10 nA
Mg Ka
2

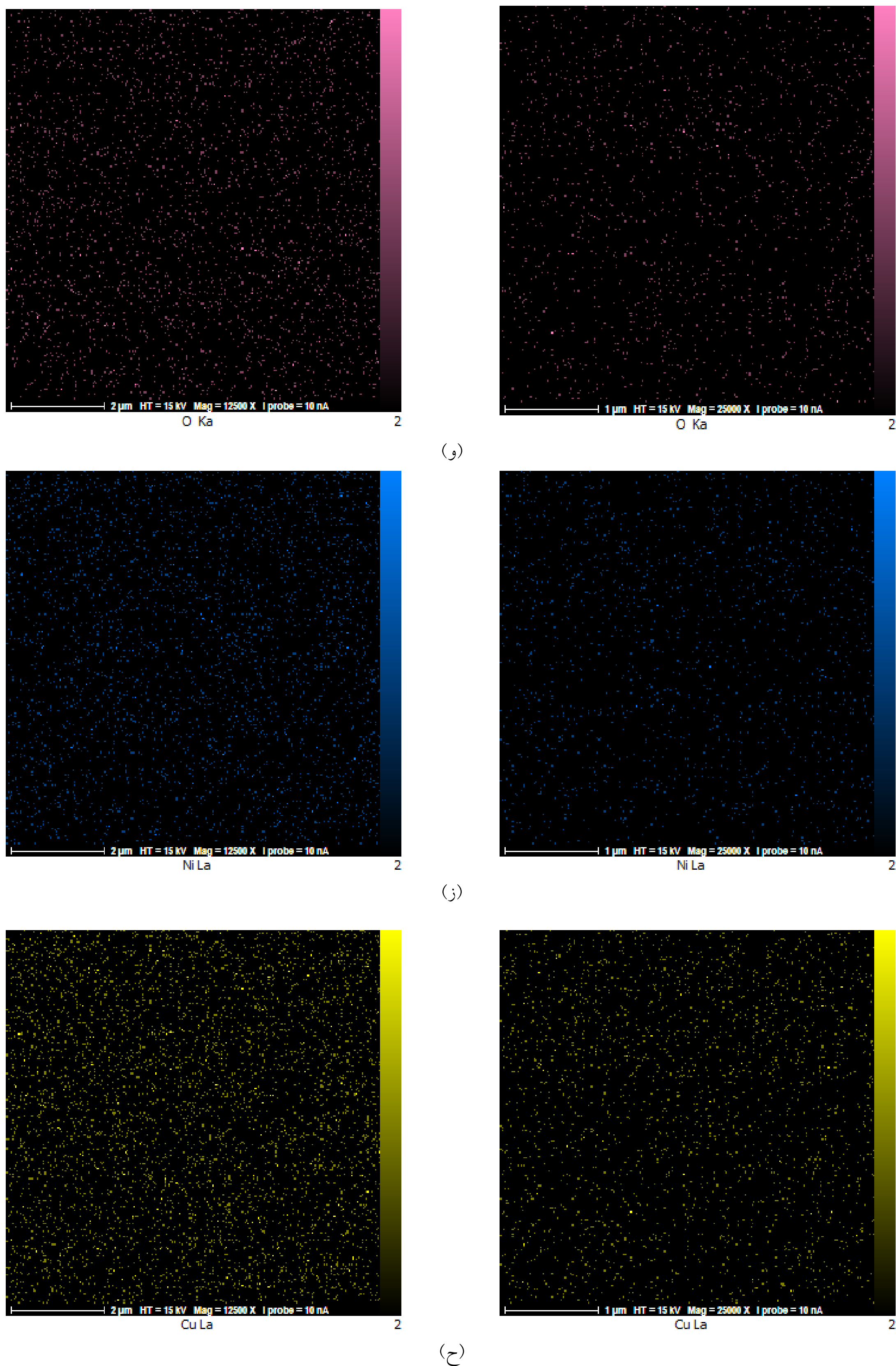

2 µm HT = 15 kV Mag = 12500 X I probe = 10 nA
Mg Ka
2

(د)

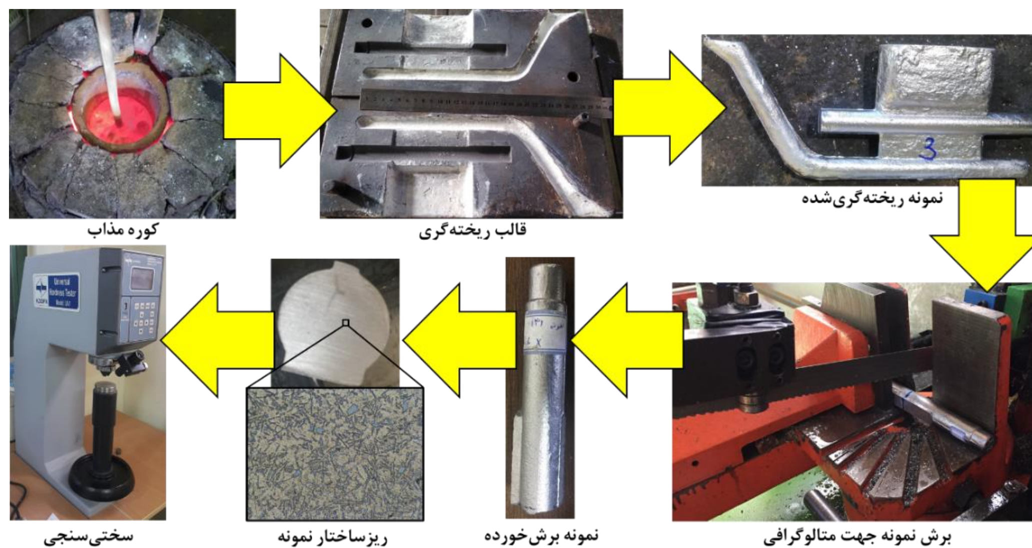

1 µm HT = 15 kV Mag = 25000 X I probe = 10 nA
Fe La
2


2 µm HT = 15 kV Mag = 12500 X I probe = 10 nA
Fe La
2

(ه)



شکل ۲ (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی نشر میدانی از سطح نانوکامپوزیت پایه‌فلزی آلومینیوم– سیلیسیم، (ب) توزیع عنصر آلومینیوم، (ج) توزیع عنصر سیلیسیم، (د) توزیع عنصر منیزیم، (هـ) توزیع عنصر آهن، (و) توزیع عنصر اکسیژن، (ز) توزیع عنصر نیکل و (ح) توزیع عنصر مس



شکل ۳ مراحل مختلف ساخت تا سختی‌سنجی نمونه‌ها

جدول ۳ جزئیات فرآیند عملیات حرارتی T6 اجراشده برروی نمونه‌ها

نوع عملیات حرارتی	انحلال		پیرسازی	
	دما (درجه سانتی‌گراد)	زمان (ساعت)	دما (درجه سانتی‌گراد)	زمان (ساعت)
T6-1	۵۰۰	۱	۲۰۰	٦
T6-2			۲۱۵	
T6-3			۲۳۰	
T6-4	۵۰۰	۳	۲۰۰	٦
T6-5			۲۱۵	
T6-6			۲۳۰	
T6-7	۵۰۰	۵	۲۰۰	٦
T6-8			۲۱۵	
T6-9			۲۳۰	

شایان ذکر است که آزمایش سختی‌سنجی با استفاده از دستگاه KOOPA Universal Hardness Tester مدل UV1 و با روش ویکرز برروی نمونه‌ها اجرا گردید. به‌منظور اطمینان از دقت نتایج به‌دست‌آمده، آزمون‌ها سه بار برروی هر نمونه اجرا شدند که شامل یک آزمون و دو تکرارپذیری بود.

نتایج و بحث

در این مقاله، به بررسی اثر استفاده هم‌زمان از نانوذرات رس و عملیات حرارتی بر سختی آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیم پیستون موتور خودرو پرداخته شده است. نتایج تجربی سختی‌سنجی آلیاژ عملیات حرارتی‌شده آلومینیوم پیستون موتور خودرو با و بدون نانوذرات تقویتی رس، در جدول (٤)، ارائه شده است. شایان ذکر است که براساس داده‌های ارائه‌شده در جدول (۳)، دمای فرآیند انحلال و زمان فرآیند پیرسازی در تمامی موارد، به‌ترتیب برابر با ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و ٦ ساعت درنظر گرفته شده است. براساس نتایج ارائه‌شده در جدول (٤)، بیشترین میزان سختی برای آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیم برابر با ۱٤۸ ویکرز و مربوط به عملیات حرارتی با زمان انحلال ۵ ساعت و دمای پیرسازی ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و کمترین آن، برابر با ۱۰۹،٦۷ ویکرز و مربوط به عملیات حرارتی با زمان انحلال ۳ ساعت و دمای پیرسازی ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد بوده است. همچنین، بیشترین میزان سختی برای نانوکامپوزیت پایه‌فلزی برابر با ۱٤٦ ویکرز و مربوط به

عملیات حرارتی با زمان انحلال ۵ ساعت و دمای پیرسازی ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و کمترین آن، برابر با ۱۱۴،۳۳ ویکرز و مربوط به عملیات حرارتی با زمان انحلال ۳ ساعت و دمای پیرسازی ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد بوده است. بررسی مراجع مختلف نشان داد که سختی به‌دست‌آمده برای هردو نوع نمونه با شرایط عملیات حرارتی مختلف، در بازه سختی ارائه‌شده برای آلیاژ پیستون در مراجع [42,43] بوده است.

بر این اساس، با افزایش دمای فرآیند پیرسازی در عملیات حرارتی، از میزان سختی هردو نوع نمونه، کاسته شده است که این امر با نتایج ارائه‌شده در مرجع [38] مطابقت دارد. همچنین، در مراجع [44,45] نیز نتایجی مشابه با نتایج به‌دست‌آمده در ای پژوهش پزارش شده که برمبنای آن، افزایش دمای پیرسازی موجب کاهش شدید سختی آلیاژ آلومینیوم شده است. براساس نتایج ارائه‌شده در جدول (٤)، در دمای پیرسازی ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، زمان انحلال با میزان سختی رابطه مستقیم داشته، بدان معنا که با افزایش زمان فرآیند انحلال بر سختی هردو نوع نمونه افزوده شده است. نتایج ارائه‌شده در جدول (٤) نشان می‌دهد که طی عملیات حرارتی با زمان پیرسازی ٦ ساعت و دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، افزودن نانوذرات رس به آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیم، موجب کاهش سختی شده است. با بررسی نتایج جدول (٤)، واضح است که اثر دمای پیرسازی بر میزان سختی نمونه بدون نانوذرات و با نانوذرات از اثر زمان انحلال بیشتر بوده است. براساس نتایج ارائه‌شده در مرجع [46]، با شرایط زمانی یکسان برای فرآیند پیرسازی، افزایش دما موجب کاهش سختی آلیاژ آلومینیوم شده که این امر به تغییرات ریزساختاری مربوط بوده است. در مرجع [16] نیز به این مسئله اشاره شده است که افزایش دمای فرآیند پیرسازی، موجب کاهش میزان سختی آلیاژ آلومینیوم شده و درمقابل، افزایش زمان این فرآیند، سختی بیشتر آلیاژ را موجب گردیده و به‌طور کل، وابستگی سختی آلیاژ آلومینیوم به فرآیند پیرسازی بیشتر از وابستگی آن به فرآیند انحلال است.

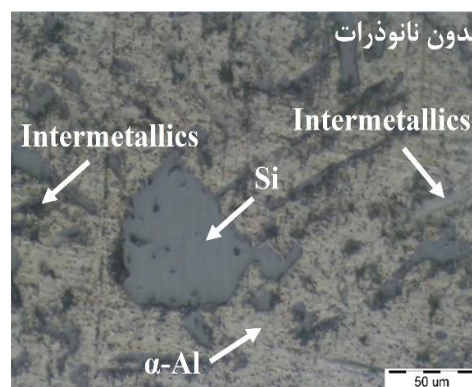
شکل (٤)، تصویر میکروسکوپ نوری را از سطح آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیم و نیز نانوکامپوزیت پایه‌فلزی آلومینیوم عملیات حرارتی‌شده با روش‌های مختلف (براساس کدگذاری جدول ۳) را نشان می‌دهد. فاز آلومینیوم زمینه، ذرات سیلیسیم و ذرات بین‌فلزی، در ریزساختار، با فلش مشخص شده‌اند. شایان ذکر است که در این شکل، ذرات بین‌فلزی با رنگ روشن، نشان‌دهنده ترکیبات آلومینیوم- مس و ذرات بین‌فلزی با رنگ تیره، نشان‌دهنده ترکیبات آلومینیوم- آهن هستند [47].

مشاهدات مشابهی درمورد فازهای آلیاژ آلومینیوم پیستون در مراجع [25,48] گزارش شده است. تغییرات ریز ساختاری پس از اجرای فرآیند عملیات حرارتی، کاملا مشهود است [49,50].

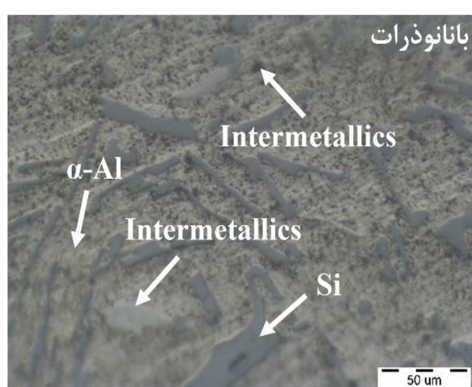
خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیم، بیشتر تحت تأثیر ذرات بلوکی‌شکل سیلیسیم است [19] و [51-53]. به‌عبارت دیگر، حضور ذرات سیلیسیم به‌شکل بلوکی، موجب افزایش خواص مکانیکی آلیاژ می‌گردد [54,55]. درواقع، ذرات سیلیسیم که به‌شکل نامنظم در فاز زمینه وجود داشته، پس از اجرای عملیات حرارتی، به‌شکل منظم و یکنواخت توزیع شده است [39,49,56]. به‌طور کل، اجرای این نوع عملیات حرارتی، موجب ایجاد دو تغییر عمده در آلیاژهای آلومینیوم شده است؛ یکی بهبود شکل‌پذیری (Ductility) و چقرمگی شکست (Fracture Toughness) درنتیجه کروی شدن ذرات سیلیسیم [57] و دیگری، بهبود تنش تسلیم [57,58]. اثر اول، از فرآیند انحلال و اثر دوم، از ترکیب فرآیند انحلال، خنک‌سازی و پیرسازی مصنوعی حاصل گردیده است [49,59,60]. با افزایش سختی آلیاژ آلومینیوم پس از اجرای عملیات حرارتی T6، می‌توان انتظار افزایش خواص مکانیکی و نیز بهبود عمر خستگی کم‌چرخه این آلیاژ را در دمای محیط داشت که این امر، درنتیجه کروی شدن ذرات سیلیسیم است [49]. خنک‌سازی پس از فرآیند انحلال، موجب ایجاد مس جامد فوق اشباع در فاز زمینه می‌گردد [50]. طی فرآیند انحلال، ترکیبات حاوی مس ساخته شده و پس از فرآیند پیرسازی رسوب می‌کنند [50]. درنتیجه فرآیند پیرسازی، خواص مکانیکی آلیاژ آلومینوم بهبود می‌یابد [39]. تئوری نابه‌جایی‌ها، افزایش خواص مکانیکی را پس از عملیات حرارتی T6، توجیه می‌کند. تحرک نابه‌جایی‌ها با ذرات رسوب‌کرده محدود می‌شود که درنتیجه این محدودیت، حرکت نابه‌جایی آهسته شده و مقاومت کششی افزایش می‌یابد [61]. مطابق تصویر ریزساختار نمونه‌ها در شکل (٤) می‌توان دریافت که اندازه ذرات سیلیسیم درنتیجه افزودن نانوذرات رس، بیشتر شده شده که این امر باتوجه‌به وجود حدود ۵۰ درصد سیلیسیم اکسید در ترکیب شیمیایی نانوذرات رس، موردانتظار بوده است. ذکر این نکته حائز اهمیت است که عملیات حرارتی، تغییری در مقدار ذرات سیلیسیم ایجاد نکرده و فقط اندازه ذرات را دچار تغییراتی می‌نماید [62].

جدول ٤ نتایج تجربی سختی‌سنجی آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیم و نانوکامپوزیت پایه‌فلزی آلومینیوم

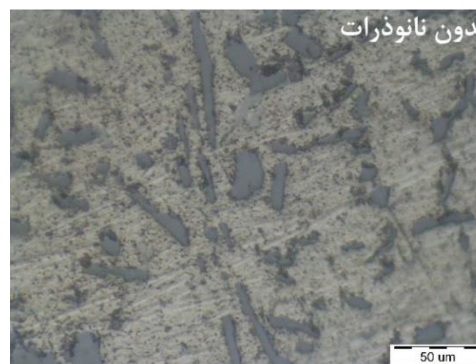
نمونه	زمان انحلال (ساعت)	دمای پیرسازی (درجه سانتی‌گراد)					
		۲۰۰		۲۱۵		۲۳۰	
		سختی ویکرز	انحراف معیار	سختی ویکرز	انحراف معیار	سختی ویکرز	انحراف معیار
بدون نانوذرات	۱	۱٤۱٫٦۷	۰٫۹٤	۱۳۳٫٦۷	۲٫۳٦	۱۱۷٫۰۰	۱٫٦۳
	۳	۱٤٥٫۰۰	۲٫۹٤	۱۳۲٫٦۷	۰٫۹٤	۱۰۹٫٦۷	۳٫۳۰
	٥	۱٤۸٫۰۰	۰٫۸۲	۱۲۹٫۰۰	۲٫۱٦	۱۱٤٫٦۷	۱٫۲٥
با نانوذرات	۱	۱۳۸٫۳۳	۲٫۸۷	۱۳۳٫۰۰	۲٫۱٦	۱۱٦٫۰۰	۰٫۸۲
	۳	۱٤۱٫٦۷	۰٫۹٤	۱۳٥٫۳۳	۱٫۲٥	۱۱٤٫۳۳	۳٫۰۹
	٥	۱٤٦٫۰۰	۲٫٤٥	۱۲٥٫٦۷	۳٫۰۹	۱۲٤٫۰۰	۱٫٦۳



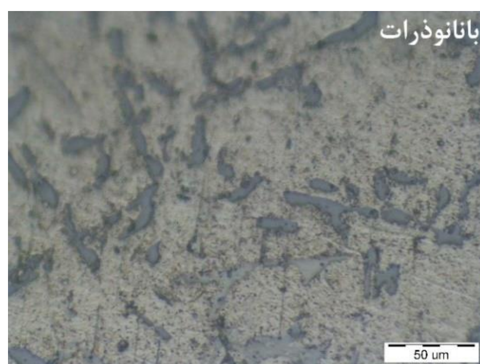
(الف)



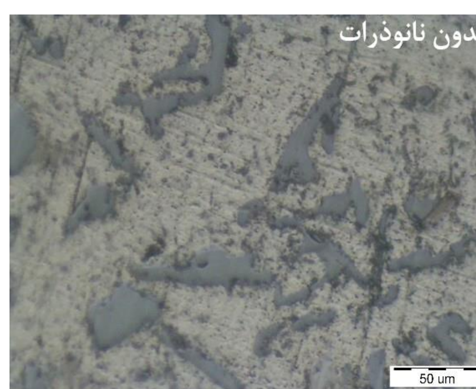
(ب)



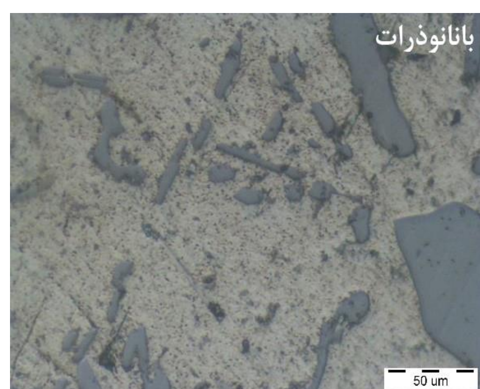
(ج)



(د)



(ه)



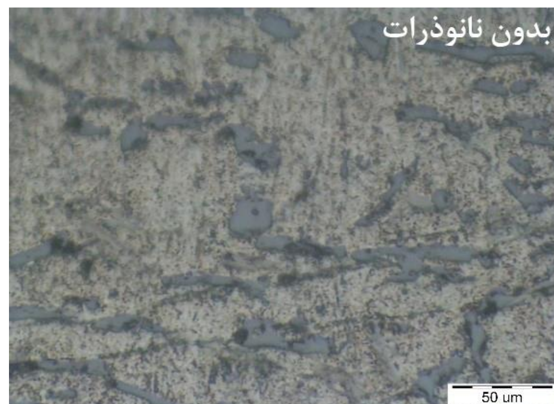
(و)


بدون نانوذرات
50 um

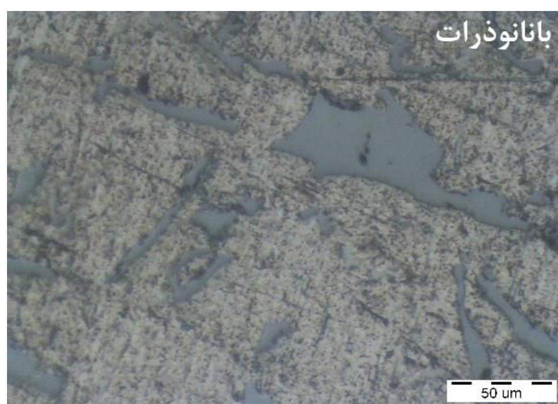
(ز)


بانانوذرات
50 um

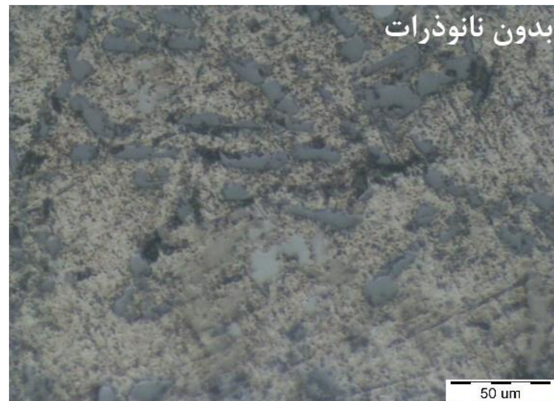
(ح)


بدون نانوذرات
50 um

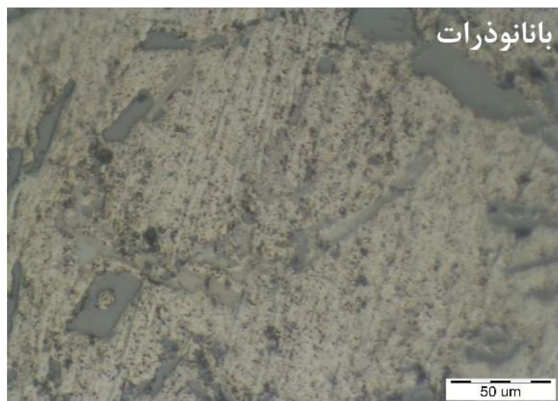
(ط)


بانانوذرات
50 um

(ی)


بدون نانوذرات
50 um

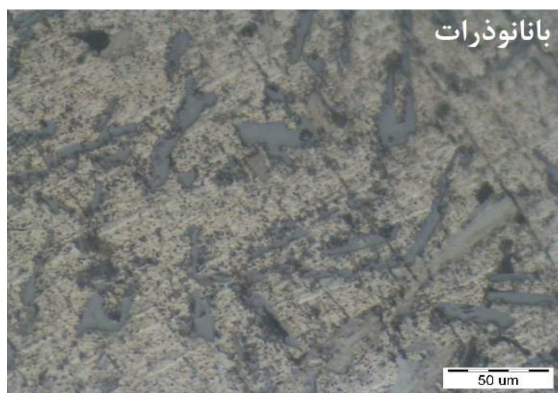
(ک)


بانانوذرات
50 um

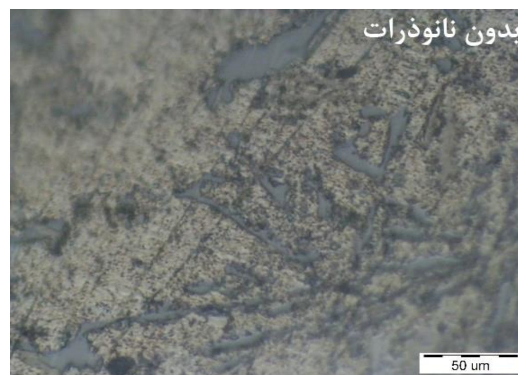
(ل)


بدون نانوذرات
50 um

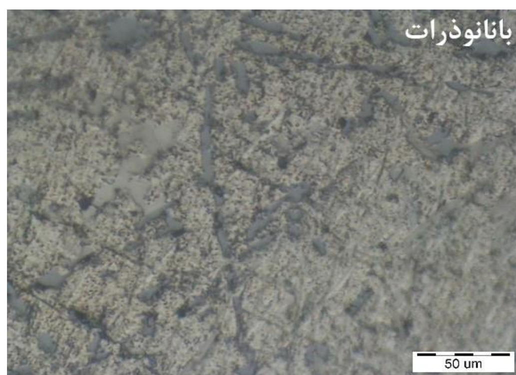
(م)


بانانوذرات
50 um

(ن)



(س)



(ع)



(ف)



(ص)

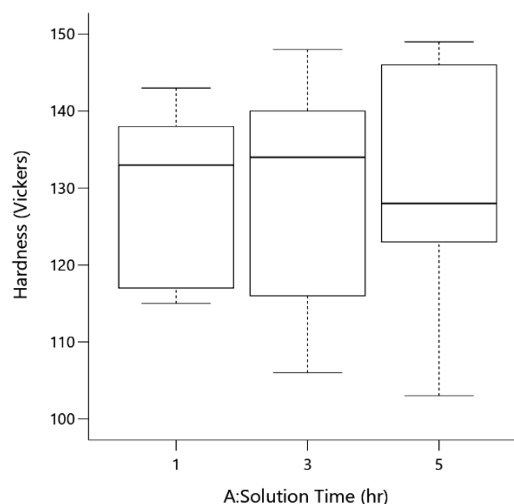
شکل ٤ تصویر میکروسکوپ نوری از سطح نمونه عملیات حرارتی‌شده با کد (الف) و (ب) T6-1، (ج) و (د) T6-2، (هـ) و (و) T6-3، (ز) و (ح) T6-4، (ط) و (ی) T6-5، (ک) و (ل) T6-6، (م) و (ن) T6-7، (س) و (ع) T6-8، (ف) و (ص) T6-9

مطابق مطالب پیشین، در این پژوهش به‌منظور انجام تحلیل حساسیت پارامترهای عملیات حرارتی و نیز استفاده از نانوذرات رس بر سختی آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیم، از روش تحلیل رگرسیون استفاده شده است. جدول (۵)، مقادیر P-value و F-value را برای پارامترهای مختلف عملیات حرارتی، نشان می‌دهد. شایان ذکر است که در این جدول، اثرگذاری یا عدم اثرگذاری و نیز میزان اثرگذاری نانوذرات رس (N)، پارامترهای عملیات حرارتی شامل زمان انحلال (t_s)، دمای پیرسازی (T_a) و نیز اثرات متقابل هریک از پارامترها، ارائه شده است. پیشتر نیز گفته شد که مقادیر کوچکتر از ۰٫۰۵ برای P-value بیانگر اثرگذار بودن پارامتر موردنظر است. همچنین، مقادیر بزرگتر برای F-value، نشان از اثرگذاری بیشتر پارامتر دارد.

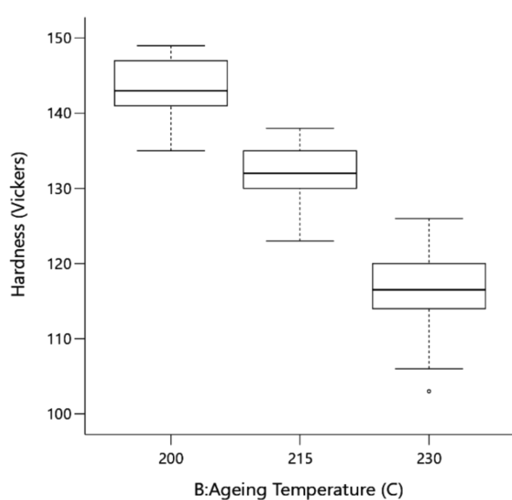
براساس نتایج ارائه‌شده در جدول (۵)، دمای پیرسازی، با P-Value کمتر از ۰٫۰۰۰۱ و نیز اثر متقابل دمای پیرسازی و استفاده از نانوذرات رس با P-Value برابر با ۰٫۰۲۸۸، پارامترهای با اثر چشمگیر در سختی هستند. بر این اساس، کمتر از ۰٫۰۱ درصد احتمال خطا برای پارامتر T_a و نیز کمتر از ۳ درصد احتمال بروز خطا برای پارامتر $T_a \times N$ وجود دارد. درواقع احتمال رخداد پارامتر T_a و $T_a \times N$ به‌ترتیب برابر با ۹۹٫۹۹ درصد و ۹۷٫۱۲ درصد خواهد بود. شکل (۵)، تغییرات سختی را برحسب پارامترهای مختلف شامل زمان انحلال، دمای پیرسازی و استفاده از نانوذرات رس، به‌شکل جداگانه، نشان می‌دهد. مطابق شکل، پراکندگی داده‌های ناشی از تغییرات زمان انحلال و نیز افزودن نانوذرات رس، نسبت به پراکندگی داده‌های مربوط به تغییرات دمای پیرسازی، بیشتر بوده است. با افزایش زمان انحلال به ۵ ساعت، از سختی نمونه به‌مقدار کمی کاسته شده است. درمقابل، شدت کاهش سختی نمونه براثر افزایش دمای پیرسازی، بسیار بیشتر بوده است. همچنین، استفاده از نانوذرات تقویتی رس نیز اندک اثر مثبتی در افزایش میزان سختی آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیم داشته است. براساس نتایج ارائه‌شده در مرجع [63]، اثر فرآیند پیرسازی بر سختی آلیاژ آلومینیوم، بیشتر از اثر فرآیند انحلال بوده به‌طوری‌که اجرای دومرحله‌ای فرآیند پیرسازی برروی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵، افزایش ۲۸ درصدی سختی آن را درمقایسه با اجرای تک‌مرحله‌ای آن در پی داشته است.

جدول ۵ اثرگذاری و میزان اثرگذاری هریک از پارامترهای مختلف بر میزان سختی

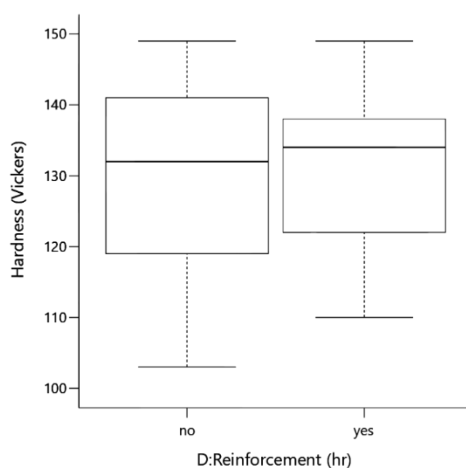
پارامتر	P-value	F-value	اثرگذاری	R^2
t_s	۰,۲۸٦۹	۱,۱٦۰۰	کم	۸۷,٤۳
T_a	<۰,۰۰۰۱	۲۹۳,۸٦۰۰	زیاد	
N	۱,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	کم	
$t_s \times t_s$	۰,٤۳۷۹	۰,٦۱۳۰	کم	
$T_a \times T_a$	۰,۱۱۱۱	۲,٦٤۰۰	کم	
$t_s \times T_a$	۰,۳۱۲۳	۱,۰٤۰۰	کم	
$t_s \times N$	۰,۵۱۲۳	۰,٤۳٦۵	کم	
$T_a \times N$	۰,۰۲۸۸	۵,۱۱۰۰	زیاد	
$t_s \times T_a \times N$	۰,۲۷٤۲	۱,۲۳۰۰	کم	



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵ تغییرات سختی برحسب پارامترهای مختلف شامل (الف) زمان انحلال، (ب) دمای پیرسازی و (ج) نانوذرات رس

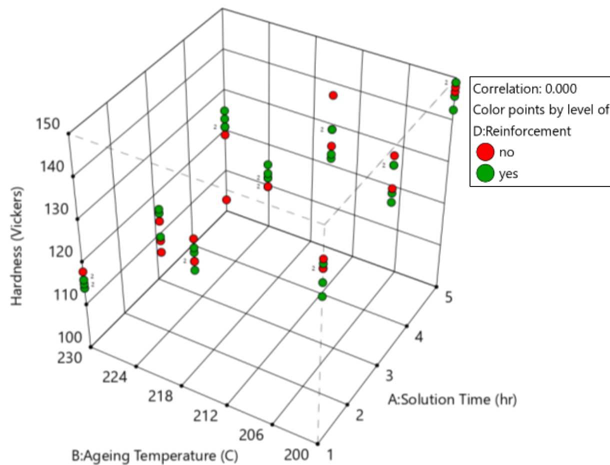
با مشـــاهده نتایج شـــکل (۵)، می‌توان دریافت که با کاهش زمان انحلال و نیز افزایش دمای پیر سازی، سختی نمونه کاهش یافته ا ست. برا ساس نتایج ارائه شده در مرجع [38] نیز افزایش دما موجب کاهش سختی آلیاژ گردیده است.

معادله به‌دســـت‌آمده برای ســـختی براســـاس نتایج تحلیل رگرسیون پارامترهای موردبررسی، در رابطه (٤) ارائه شده است. شـایان ذکر اسـت که رابطه حاصـل از پارامترهای تعریف‌شـده پاسخ به‌دست‌آمده، برای شرایط مختلف عملیات حرارتی برروی آلیاژ موردنظر، قابل‌استفاده است [64]. از این روش، می‌توان در ارزیابی خواص مختلف آلیاژ آلومینیوم شـامل مقاومت تسـلیم، مقاومت ضـربه، سـختی و نیز خواص خسـتگی، اسـتفاده نمود [64-66].

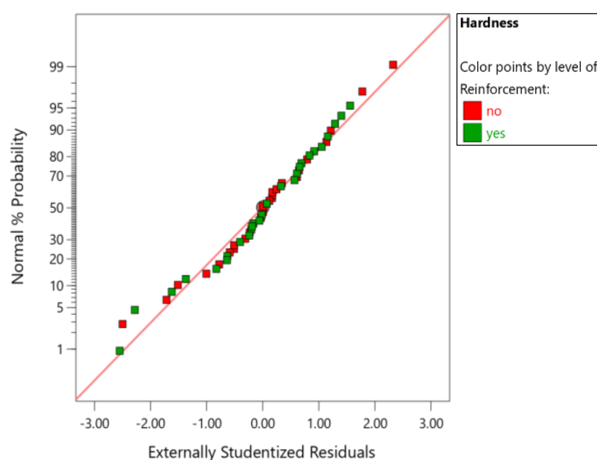
$$\text{Hardness} = 0.8611 \times t_s - 13.69 \times T_a + 1.08 \times {t_s}^2 - 2.25 \times {T_a}^2 - t_s \times T_a + 0.5278 \times t_s \times N + 1.81 \times T_a \times N + 1.08 \times t_s \times T_a \times N \quad (٤)$$

شکل (٦)، نمودار سختی را برحسب زمان انحلال و دمای پیر سازی نشان می‌دهد. برا ساس نتایج ارائه شده در این شکل، بیشترین میزان سختی برای آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیم، با اجرای عملیات حرارتی با زمان انحلال ۵ سـاعت دمای پیرسـازی ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، به‌دست آمده است. همچنین مشاهده می‌شود که افزایش زمان انحلال از ۱ ساعت به ۵ ساعت موجب افزایش تدریجی سختی شده است. واضح است که افزایش دمای فرآیند پیرسازی موجب کاهش سختی گردیده است. نتایج ارائه‌شده در مراجع [5,67] نیز مؤید نتایج به‌دســت‌آمده در این پژوهش مبنی بر کاهش میزان ســختی نمونه درنتیجه افزایش دمای پیرســازی است.

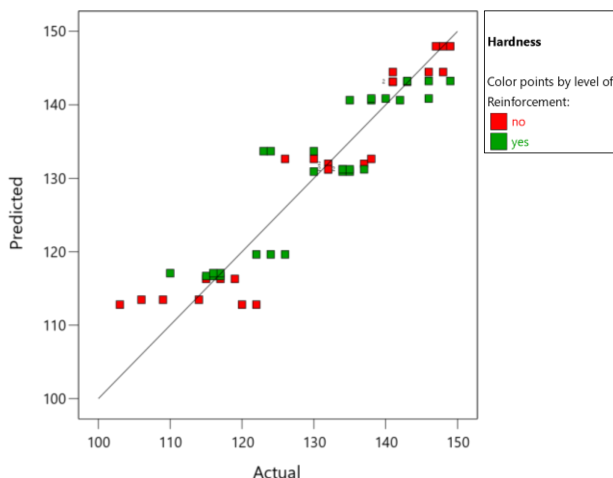
شـــکل (۷)، توزیع نرمال خطی داده‌های ســـختی را نشـــان می‌دهد. شـــکل (۸)، پراکندگی نتایج تجربی حاصـــل از آزمون سختی‌سنجی را نسبت به داده‌های تئوری سختی به‌دست‌آمده با رابطه (٤) نشان می‌دهد. برا ساس نتایج ارائه شده در شکل (۸)، پراکندگی داده‌های تئوری نســـبت به نتایج تجربی، کمتر از ۱۰ در صد بوده و این امر نشان از دقت مدل تخمینی برای محاسبه سختی نمونه‌ها دارد.



شکل ٦ نمودار سختی برحسب زمان انحلال و دمای پیرسازی برای نمونه با و بدون نانوذرات رس



شکل ۷ توزیع نرمال داده‌های سختی برای نمونه‌های با و بدون نانوذرات رس



شکل ۸ پراکندگی داده‌های تجربی و تئوری سختی برای نمونه‌های با و بدون نانوذرات رس

جدول (٦)، مقایسه نتایج تجربی سختی‌سنجی آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیم و نیز نانوکامپوزیت پایه‌فلزی را با نتایج به‌دست‌آمده از مدل رگرسیون نشان می‌دهد. براساس نتایج ارائه‌شده در این جدول، میانگین خطای نسبی حاصل از اختلاف نتایج سختی‌سنجی تجربی و نتایج تئوری حاصل از مدل رگرسیون، برابر با ٢,٦١ درصد بوده است. همچنین، بیشینه خطای نسبی، برابر با ٩,٥٢ درصد و مربوط به اختلاف نتایج تجربی و تئوری نمونه عملیات حرارتی‌شده بدون نانو با ٥ ساعت انحلال در دمای ٥٠٠ درجه سانتی‌گراد و ٦ ساعت پیرسازی در دمای ٢٣٠ درجه سانتی‌گراد بوده است. شایان ذکر است که براساس نتایج ارائه‌شده در جدول (٦)، داده‌ها از پراکندگی مناسبی برخوردار بوده به‌طوری‌که ضریب اسکترباند داده‌ها، برابر با ١,١١ بوده که نشان از دقت مدل رگرسیون داشته و مؤید نتایج ارائه‌شده در شکل (٨) است.

جدول ٦ مقایسه سختی تجربی با نتایج تئوری حاصل از آنالیز رگرسیون

وجود نانوذرات	فرآیند انحلال		فرآیند پیرسازی		سختی (ویکرز)		خطای نسبی (درصد)
	دما (درجه سانتی‌گراد)	زمان (ساعت)	دما (درجه سانتی‌گراد)	زمان (ساعت)	تجربی	تخمینی	
خیر	٥٠٠	١	٢٠٠	٦	١٤١	١٤٣,١٤	١,٥٢
خیر	٥٠٠	١	٢٠٠	٦	١٤١	١٤٣,١٤	١,٥٢
خیر	٥٠٠	١	٢٠٠	٦	١٤٣	١٤٣,١٤	٠,١٠
خیر	٥٠٠	١	٢١٥	٦	١٣٢	١٣١,٩٧	٠,٠٢
خیر	٥٠٠	١	٢١٥	٦	١٣٢	١٣١,٩٧	٠,٠٢
خیر	٥٠٠	١	٢١٥	٦	١٣٧	١٣١,٩٧	٣,٦٧
خیر	٥٠٠	١	٢٣٠	٦	١١٥	١١٦,٣١	١,١٤
خیر	٥٠٠	١	٢٣٠	٦	١١٩	١١٦,٣١	٢,٢٦
خیر	٥٠٠	١	٢٣٠	٦	١١٧	١١٦,٣١	٠,٥٩
خیر	٥٠٠	٣	٢٠٠	٦	١٤٨	١٤٤,٤٧	٢,٣٩
خیر	٥٠٠	٣	٢٠٠	٦	١٤١	١٤٤,٤٧	٢,٤٦
خیر	٥٠٠	٣	٢٠٠	٦	١٤٦	١٤٤,٤٧	١,٠٥
خیر	٥٠٠	٣	٢١٥	٦	١٣٤	١٣١,٢٢	٢,٠٧
خیر	٥٠٠	٣	٢١٥	٦	١٣٢	١٣١,٢٢	٠,٥٩
خیر	٥٠٠	٣	٢١٥	٦	١٣٢	١٣١,٢٢	٠,٥٩
خیر	٥٠٠	٣	٢٣٠	٦	١٠٦	١١٣,٤٧	٧,٠٥
خیر	٥٠٠	٣	٢٣٠	٦	١١٤	١١٣,٤٧	٠,٤٦
خیر	٥٠٠	٣	٢٣٠	٦	١٠٩	١١٣,٤٧	٤,١٠
خیر	٥٠٠	٥	٢٠٠	٦	١٤٧	١٤٧,٩٧	٠,٦٦
خیر	٥٠٠	٥	٢٠٠	٦	١٤٨	١٤٧,٩٧	٠,٠٢
خیر	٥٠٠	٥	٢٠٠	٦	١٤٩	١٤٧,٩٧	٠,٦٩
خیر	٥٠٠	٥	٢١٥	٦	١٣٠	١٣٢,٦٤	٢,٠٣
خیر	٥٠٠	٥	٢١٥	٦	١٢٦	١٣٢,٦٤	٥,٢٧
خیر	٥٠٠	٥	٢١٥	٦	١٣٨	١٣٢,٦٤	٣,٨٨
خیر	٥٠٠	٥	٢٣٠	٦	١٠٣	١١٢,٨١	٩,٥٢
خیر	٥٠٠	٥	٢٣٠	٦	١٢٢	١١٢,٨١	٧,٥٣
خیر	٥٠٠	٥	٢٣٠	٦	١٢٠	١١٢,٨١	٥,٩٩
بله	٥٠٠	١	٢٠٠	٦	١٣٨	١٤٠,٦٤	١,٩١

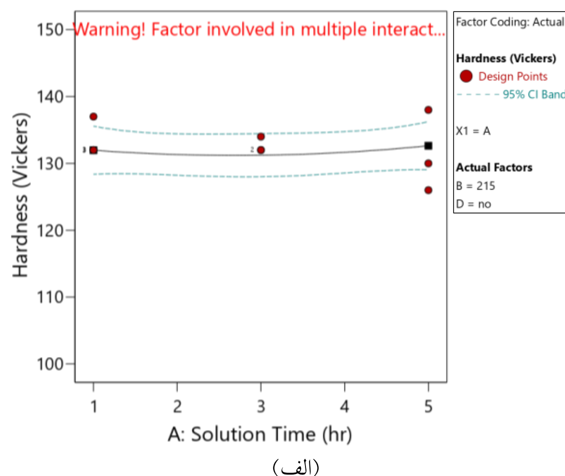
وجود	فرآیند انحلال		فرآیند پیرسازی		سختی (ویکرز)		خطای نسبی
نانوذرات	دما (درجه سانتی‌گراد)	زمان (ساعت)	دما (درجه سانتی‌گراد)	زمان (ساعت)	تجربی	تخمینی	(درصد)
بله	۵۰۰	۱	۲۰۰	٦	۱۳٥	۱٤۰,٦٤	٤,۱۸
بله	۵۰۰	۱	۲۰۰	٦	۱٤۲	۱٤۰,٦٤	۰,۹٦
بله	۵۰۰	۱	۲۱٥	٦	۱۳۰	۱۳۰,۹۲	۰,۷۱
بله	۵۰۰	۱	۲۱٥	٦	۱۳٤	۱۳۰,۹۲	۲,۳۰
بله	۵۰۰	۱	۲۱٥	٦	۱۳٥	۱۳۰,۹۲	۳,۰۲
بله	۵۰۰	۱	۲۳۰	٦	۱۱٦	۱۱٦,٦۹	۰,٥۹
بله	۵۰۰	۱	۲۳۰	٦	۱۱٥	۱۱٦,٦۹	۱,٤۷
بله	۵۰۰	۱	۲۳۰	٦	۱۱۷	۱۱٦,٦۹	۰,۲٦
بله	۵۰۰	۳	۲۰۰	٦	۱۳۸	۱٤۰,۸٦	۲,۰۷
بله	۵۰۰	۳	۲۰۰	٦	۱٤٦	۱٤۰,۸٦	۳,٥۲
بله	۵۰۰	۳	۲۰۰	٦	۱٤۰	۱٤۰,۸٦	۰,٦۱
بله	۵۰۰	۳	۲۱٥	٦	۱۳٤	۱۳۱,۲۲	۲,۰۷
بله	۵۰۰	۳	۲۱٥	٦	۱۳۷	۱۳۱,۲۲	٤,۲۲
بله	۵۰۰	۳	۲۱٥	٦	۱۳٥	۱۳۱,۲۲	۲,۸۰
بله	۵۰۰	۳	۲۳۰	٦	۱۱۷	۱۱۷,۰۸	۰,۰۷
بله	۵۰۰	۳	۲۳۰	٦	۱۱۰	۱۱۷,۰۸	٦,٤٤
بله	۵۰۰	۳	۲۳۰	٦	۱۱٦	۱۱۷,۰۸	۰,۹۳
بله	۵۰۰	٥	۲۰۰	٦	۱٤۳	۱٤۳,۲٥	۰,۱۷
بله	۵۰۰	٥	۲۰۰	٦	۱٤۹	۱٤۳,۲٥	۳,۸٦
بله	۵۰۰	٥	۲۰۰	٦	۱٤٦	۱٤۳,۲٥	۱,۸۸
بله	۵۰۰	٥	۲۱٥	٦	۱۲۳	۱۳۳,٦۹	۸,٦۹
بله	۵۰۰	٥	۲۱٥	٦	۱۳۰	۱۳۳,٦۹	۲,۸٤
بله	۵۰۰	٥	۲۱٥	٦	۱۲٤	۱۳۳,٦۹	۷,۸۱
بله	۵۰۰	٥	۲۳۰	٦	۱۲٦	۱۱۹,٦٤	٥,۰٥
بله	۵۰۰	٥	۲۳۰	٦	۱۲۲	۱۱۹,٦٤	۱,۹۳
بله	۵۰۰	٥	۲۳۰	٦	۱۲٤	۱۱۹,٦٤	۳,٥۲

شکل (۹)، اثر پارامترهای مختلف شامل زمان انحلال، دمای پیرسازی و استفاده از نانوذرات رس را بر سختی آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیم نشان می‌دهد. مطابق شکل، درنتیجه افزایش زمان انحلال روند محسوسی برای سختی نمونه مشاهده نمی‌شود. درحالی‌که افزایش دمای پیرسازی کاهش شدید سختی نمونه را موجب شده است. به‌طور کل، دمای بالاتر در فرآیند پیرسازی، موجب رشد سینماتیک رسوبات و درنتیجه، کاهش میزان سختی ماده می‌گردد [68]. مشابه نتیجه افزایش زمان انحلال درمورد استفاده از نانوذرات رس نیز مشاهده می‌شود؛ به‌طوری‌که می‌توان دریافت استفاده از نانوذرات رس اثر چشمگیری بر سختی نمونه نداشته است.

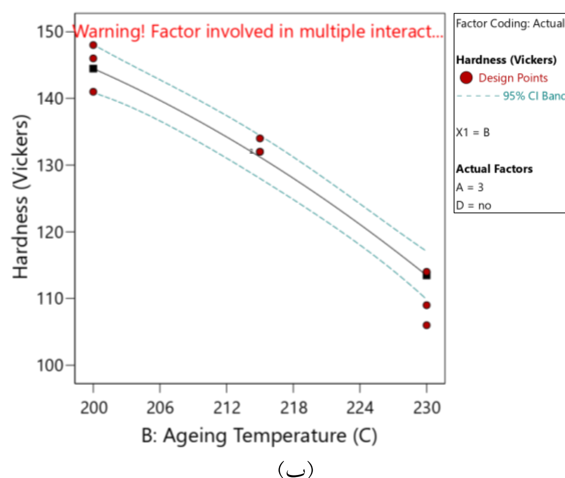
به عبارت دیگر، نمونه آلومینیوم- سیلیسیم و نانوکامپوزیت پایه‌فلزی آلومینیوم، سختی نسبتا مشابهی دارند.

شکل (۱۰)، اثر متقابل زمان انحلال و دمای پیرسازی را بر سختی نمونه بدون نانوذرات و با نانوذرات رس، نشان می‌دهد. مطابق شکل، نمودارهای مربوط به زمان انحلال و دمای پیرسازی برای هردو نوع نمونه با و بدون نانوذرات یکدیگر را قطع نکرده است. درنتیجه، در بازه تعریف‌شده یعنی زمان‌های ۱ ساعت، ۳ ساعت و ۵ ساعت برای فرآیند انحلال و نیز دماهای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، ۲۱۵ درجه سانتی‌گراد و ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد برای

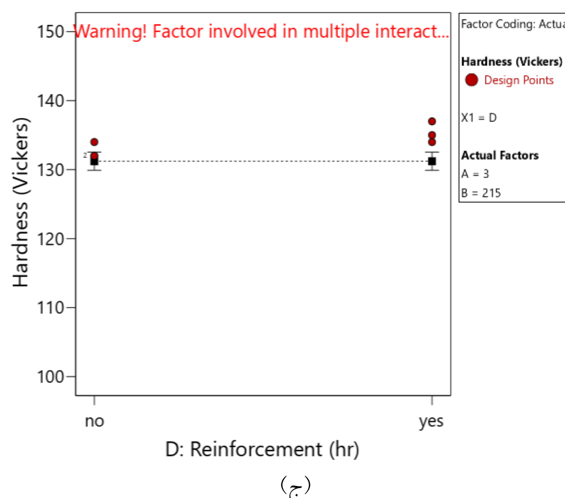
فرآیند پیرسازی، اثر متقابل وجود ندارد. شایان ذکر است که باتوجه به شیب خطوط، نمودارها قطعا در خارج بازه تعریف‌شده یکدیگر را قطع کرده و در کل، تقابل وجود دارد که موضوع اصلی موردبررسی در این مقاله نبوده است.



(الف)

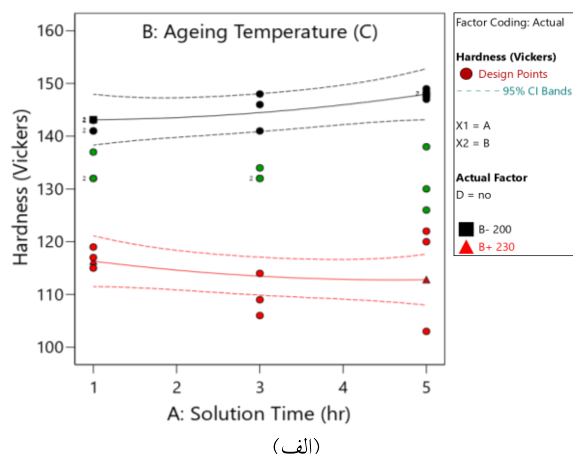


(ب)

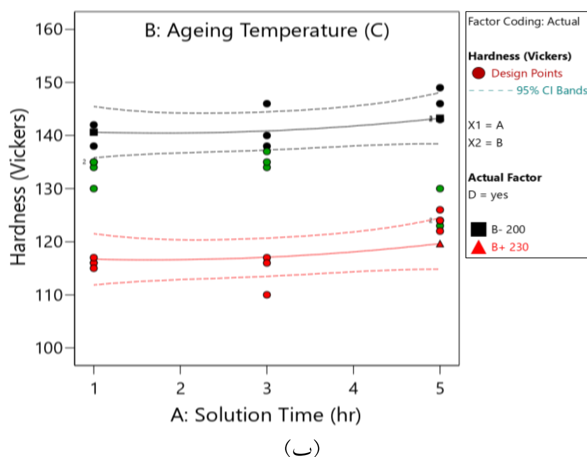


(ج)

شکل ۹ اثر پارامترهای (الف) زمان انحلال، (ب) دمای پیرسازی و (ج) نانوذرات رس، بر سختی نمونه



(الف)



(ب)

شکل ۱۰ اثر متقابل زمان انحلال و دمای پیرسازی بر سختی نمونه (الف) بدون نانوذرات و (ب) با نانوذرات

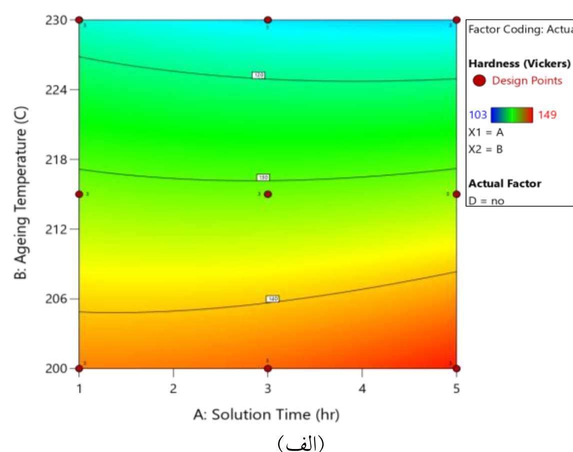
به‌منظور بررسی دقیق‌تر اثر پارامترهای عملیات حرارتی بر سختی نمونه، نمودار کانتور تأثیر پارامترهای عملیات حرارتی بر سختی نمونه بدون نانوذرات و با نانوذرات رس، در شکل (۱۱) ارائه شده است. همانطور که قابل‌مشاهده است، کاهش دمای پیرسازی موجب افزایش سختی نمونه با و بدون نانوذرات شده است. درمقابل، افزایش دمای پیرسازی، سختی هردو نوع نمونه را کاهش داده است.

نتایج به‌دست‌آمده، با نتایج ارائه‌شده در مرجع [16]، مطابقت دارد. افزایش سختی طی فرآیند پیرسازی را می‌توان به چندین بخش ازجمله جوانه‌زنی نواحی خوشه‌ای خالی، تشکیل ناحیه گینیر- پرستون، جوانه‌زنی و رشد سریع رسوبات ذرات ریز و... که به‌شکل نیمه‌منسجم با فاز آلومینیوم زمینه هستند، تقسیم نمود. این امر موجب افزایش مقاومت آلیاژ آلومینیوم می‌گردد [69].

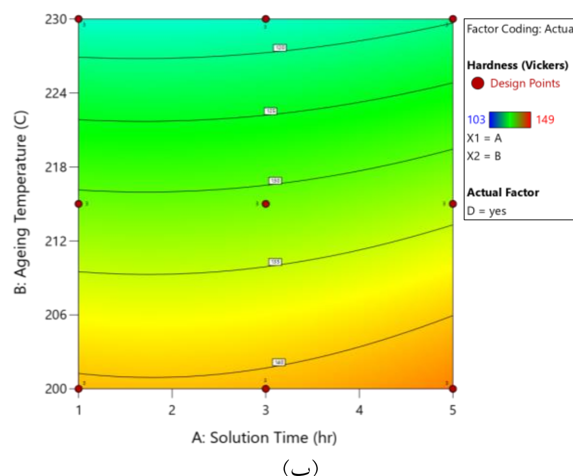
شکل (۱۲)، نمودار رگرسیون خطی چندگانه را برای اثر پارامترهای عملیات حرارتی بر سختی نمونه با و بدون نانوذرات

رس نشان می‌دهد. با بررسی این نمودار نیز می‌توان دریافت که کاهش دمای پیرسازی، سختی هردو نمونه را افزایش داده است [38].

همچنین، برای نمونه عملیات حرارتی‌شده با فرآیند پیرسازی تحت ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، افزایش زمان انحلال سختی نمونه را افزایش داده است. بر اساس نتایج ارائه شده در مرجع [70] نیز افزایش زمان انحلال و کاهش دمای پیرسازی، موجب افزایش سختی آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیم می‌گردد. کاهش دما و نیز زمان فرآیند پیرسازی، موجب افزایش سختی شده و به تبع آن، خواص کششی، سایشی و خستگی ماده بهبود می‌یابد [71,72]. بررسی ریز ساختار آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیم عملیات حرارتی‌شده با بیشترین میزان سختی، وجود رسوبات گرد سیلیسیم را در فضای بین‌دندریتی فاز آلومینیوم (در مرز دانه) نشان داد [70]. به‌طور کل، عملیات حرارتی موجب تغییر شکل فاز سیلیسیم و بهبود خواص خستگی و مکانیکی آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیم می‌گردد [11] و [62,63].

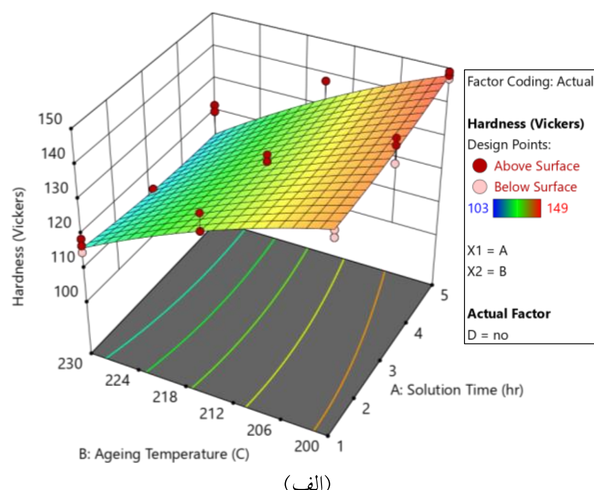


(الف)

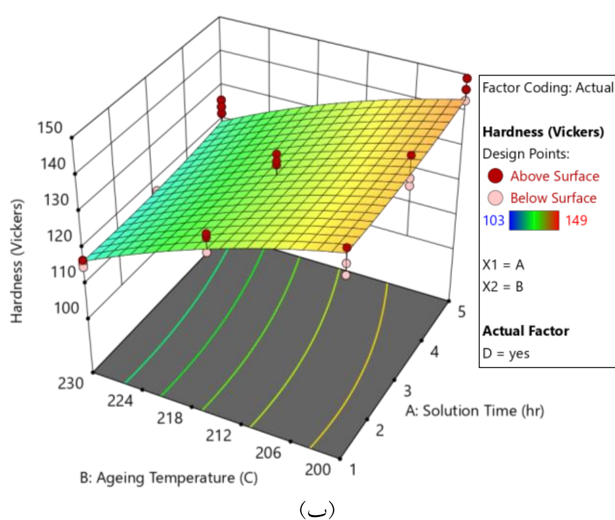


(ب)

شکل ۱۱ نمودار کانتور پارامترهای عملیات حرارتی بر سختی نمونه (الف) بدون نانوذرات و (ب) با نانوذرات



(الف)



(ب)

شکل ۱۲ نمودار رگرسیون خطی چندگانه برای اثر عملیات حرارتی بر سختی نمونه (الف) بدون نانوذرات و (ب) با نانوذرات رس

نتیجه‌گیری

در این مقاله، به تحلیل حساسیت پارامترهای عملیات حرارتی شامل انحلال و پیرسازی و نیز، افزودن نانوذرات خاک رس، بر سختی آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیم پیستون موتور خودرو، پرداخته شده است. خلاصه نتایج حاصل از این پژوهش، به‌صورت زیر است:

۱. سختی آلیاژ پایه پس از افزودن نانوذرات و اجرای فرآیند عملیات حرارتی، افزایش یافت.

۲. زمان انحلال به‌تنهایی، اثر معناداری بر سختی آلیاژ آلومینیوم نداشت.

۳. افزایش دمای فرآیند پیرسازی، موجب کاهش سختی آلیاژ گردید.

٤. افزودن نانوذرات، موجب افزایش اندک در مقدار سختی ماده شد.
٥. عملیات حرارتی و افزودن نانوذرات، موجب کروی شــــدن ذرات سیلیسیم در ریزساختار ماده و درنتیجه، افزایش سختی آلیاژ شدند.
٦. سختی هردو نمونه، طی فرآیند انحلال با زمان ٥ ساعت و فرآیند پیرسازی با دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، به بیشترین مقدار خود رسید. بر این اساس، بیشترین میزان سختی برای آلیاژ آلومینیوم و نانوکامپوزیت پایه‌فلزی طی عملیات حرارتی با شرایط فوق، به‌ترتیب برابر با ١٤٨ و ١٤٦ ویکرز بوده است.
٧. تطابق خوبی میان نتایج تجربی سختی‌سنجی با نتایج تئوری حاصل از مدل رگرسیون مشاهده گردید به‌طوری‌که میانگین و بیشینه خطای نسبی حاصل از اختلاف نتایج تجربی و تئوری سختی‌سنجی، به‌ترتیب برابر با ٢,٦١ و ٩,٥٢ درصد به‌دست آمد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان، از شرکت موتورسازی پویانیستانک جهت فراهم نمودن مواد اولیه و تجهیزات لازم جهت ریخته‌گری و از دانشکده مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه سمنان جهت همکاری در اجرای فرآیندهای متالورژیکی، قدردانی می‌نمایند.

مراجع

[1] M. Azadi, “Effects of Strain Rate and Mean Strain on Cyclic Behavior of Aluminum Alloys under Isothermal and Thermo-Mechanical Fatigue Loadings,” *International Journal of Fatigue*, vol. 47, pp. 148-153, 2013.

[2] H. Bahmanabadi, *Experimental and Numerical Study on Low-cycle Fatigue Behavior of Aluminum Metal Matrix Nanocomposite at Different Temperatures*, MSc Thesis, Semnan University, 2020, (In Persian).

[3] M. Zolfaghari, I*nvestigation of Nano-Particles Addition Effect on Bending High-Cycle Fatigue Lifetime in Engine Piston Aluminum Alloy*, MSc Thesis, Semnan University, 2018, (In Persian).

[4] J. Mohamadigangaraj, S. Nourouzi, H. Jamshidi Aval, “The Effect of Heat Treatment and Cooling Conditions on Friction Stir Processing of A390-10 wt% SiC Aluminium Matrix Composite,” *Materials Chemistry and Physics*, vol. 263, pp. 124423, 2021.

[5] M. Alphonse, V. K. B. Raja, M. S. Vivek, N. V. S. D. Raj, M. S. S. Darshan, P. Bharmal, “Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties of Forged Aluminium Alloy AA2219,” Materials Today: Proceedings, vol. 44, pp. 3811-3815, 2021.

[6] M. Azadi, S. Rezanezhad, M. Zolfaghari, M. Azadi, “Effects of Various Ageing Heat Treatments on Microstructural Features and Hardness of Piston Aluminum Alloy,” *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, vol. 32, no. 1, pp. 92-98, 2019.

[7] E. Rajkeerthi, C. P. Satyanarayan, M. Jaivignesh, N. Pradeep, P. Hariharan, “Effect of Heat Treatment on Strength of Aluminium Matrix Composites,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 46, pp. 4419-4425, 2020.

[8] B. Safarbali, M. Shamanian, A. Eslami, “Effect of Post-Weld Heat Treatment on Joint Properties of Dissimilar Friction Stir Welded 2024-T4 and 7075-T6 Aluminum Alloys,” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, vol. 28, no. 7, pp. 1287-1297, 2018.

[9] Z. Yuan, W. Tian, F. Li, Q. Fu, X. Wang, W. Qian, W. An, “Effect of Heat Treatment on The Interface of High-Entropy Alloy Particles Reinforced Aluminum Matrix Composites,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 822, pp.

153658, 2020.

[10] A. K. Padap, A.P. Yadav, P. Kumar, N. Kumar, "Effect of Aging Heat Treatment and Uniaxial Compression on Thermal Behavior of 7075 Aluminum Alloy," *Materials Today: Proceedings*, vol. 33, pp. 5442-5447, 2020.

[11] M. Azadi, H. Bahmanabadi, F. Gruen, G. Winter, "Evaluation of Tensile and Low-Cycle Fatigue Properties at Elevated Temperatures in Piston Aluminum-Silicon Alloys With and Without Nano-Clay-Particles and Heat Treatment," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 788, pp. 139497, 2020.

[12] J. Yi, G. Wang, S. Li, Z. Liu, Y. Gong, "Effect of Post-Weld Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Welded Joints of 6061-T6 Aluminum Alloy," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, vol. 29, no. 10, pp. 2035-2046, 2019.

[13] M. Azadi, S. Rezanezhad, M. Zolfaghari, M. Azadi, "Investigation of Tribological and Compressive Behaviors of Al/SiO_2 Nanocomposites After T6 Heat Treatment," *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, vol. 45, no. 1, 2020.

[14] S. Prakash, R. John Felix Kumar, S. Jerome, "Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of CNT Welded Aluminium Alloy 2024," *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 13, pp. 26997-27003, 2018.

[15] M. Azadi, A. Basiri, A. Dadashi, G. Winter, B. Seisenbacher, F. Gruen, "Effect of Nano-Clay Addition and Heat-Treatment on Tensile and Stress-Controlled Low-Cycle Fatigue Behaviors of Aluminum-Silicon Alloy: Effect of Nano-Clay Addition and Heat-Treatment," *Frattura ed Integrità Strutturale*, vol. 15, no. 57, pp. 373-397, 2021.

[16] M. J. Sharifi, M. Azadi, M. Azadi, "Sensitivity Analysis of Heat Treatment Parameters on Cylinder-head Aluminum Alloy Properties by Regression Method," *Journal of Metallurgical and Materials Engineering*, vol. 32, no. 1, pp. 57-74, 2021, (In Persian).

[17] M. Azadi, *Improvement and Optimization of Vibration Behavior of a vehicle full body by Design of Experiments*, MSc Thesis, K.N. Toosi University of Technology, 2013, (In Persian).

[18] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley and Sons, 2017.

[19] M. Azadi, H. Bahmanabadi, J. Torkian, G. Nosrat, "Investigation of Nano-Clay Particles Addition on Microstructure, Fracture Surface, and Mechanical Properties of Piston Aluminum Alloy in Automotive Engine," *Sharif Journal of Mechanical Engineering*, vol. 36.3, no. 2, pp. 41-49, 2020, (In Persian).

[20] M. Wang, J. C. Pang, H. Q. Liu, S. X. Li, Z. F. Zhang, "Influence of Microstructures on The Tensile and Low-Cycle Fatigue Damage Behaviors of Cast Al12Si4Cu3NiMg Alloy," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 759, pp. 797-803, 2019.

[21] M. Wang, J. C. Pang, H. Q. Liu, C. L. Zou, S. X. Li, Z. F. Zhang, "Deformation Mechanism and Fatigue Life of An Al-12Si Alloy at Different Temperatures and Strain Rates," *International Journal of Fatigue*, vol. 127, pp. 268-274, 2019.

[22] R. Canyook, R. Utakrut, C. Wongnichakorn, K. Fakpan, S. Kongiang, "The Effects of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Rheocasting ADC12 Aluminum Alloy," *in Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 3, pp. 9476-9482, 2018.

[23] C. L. Chen, A. Richter, R. C. Thomson, "Mechanical Properties of Intermetallic Phases in Multi-Component Al-Si

Alloys Using Nanoindentation," *Intermetallics,* vol. 17, no. 8, pp. 634-641, 2009.

[24] Z. Asghar, G. Requena, H. P. Degischer, P. Cloetens, "Three-Dimensional Study of Ni Aluminides in An AlSi12 Alloy by Means of Light Optical and Synchrotron Microtomography," *Acta Materialia,* vol. 57, no. 14, pp. 4125-4132, 2009.

[25] Y. Li, Y. Yang, Y. Wu, L. Wang, X. Liu, "Quantitative Comparison of Three Ni-Containing Phases to The Elevated-Temperature Properties of Al-Si Piston Alloys," *Materials Science and Engineering A,* vol. 527, no. 26, pp. 7132-7137, 2010.

[26] C. Y. Jeong, "Effect of Alloying Elements on High Temperature Mechanical Properties for Piston Alloy," *Materials Transactions,* vol. 53, no. 1, pp. 234-239, 2012.

[27] C. B. Basak, A. Meduri, N. Hari Babu, "Influence of Ni in High Fe Containing Recyclable Al-Si Cast Alloys," *Materials and Design,* vol. 182, pp. 108017, 2019.

[28] P. Apichai, J. Kajornchiyakul, J. T. H. Pearce, A. Wiengmoon, "Effect of Precipitation Hardening Temperatures and Times on Microstructure, Hardness and Tensile Properties of Cast Aluminium Alloy A319," *Naresuan University Engineering Journal,* vol. 6, no. 1, pp. 28-33, 2011.

[29] E. Feyzullahoğ lu, A. T. Ertürk, E. A. Guven, "Influence of Forging and Heat Treatment on Wear Properties of Al-Si and Al-Pb Bearing Alloys in Oil Lubricated Conditions," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition),* vol. 23, no. 12, pp. 3575-3583, 2013.

[30] A. M. Samuel, E. M. Elgallad, H. W. Doty, S. Valtierra, F. H. Samuel, "Effect of Metallurgical Parameters on The Microstructure, Hardness Impact Properties, and Fractography of Al-(6.5-11.5) wt% Si based Alloys," *Materials and Design,* vol. 107, pp. 426-439, 2016.

[31] R. K. Singh, A. Telang, M. M. Khan, "Effect of T6 Heat Treatment on Microstructure, Mechanical Properties and Abrasive Wear Response of Fly Ash Reinforced Al-Si Alloy," *Materials Today: Proceedings,* vol. 4, no. 9, pp. 10062-10068, 2017.

[32] W. Kasprzak, H. Kurita, G. Birsan, B. S. Amirkhiz, "Hardness Control of Al-Si HPDC Casting Alloy via Microstructure Refinement and Tempering Parameters," *Materials and Design,* vol. 103, pp. 365-376, 2016.

[33] S. Joseph, S. Kumar, R. P. Babu, "Compressive Flow Behavior of Al-Si based Alloy: Role of Heat Treatment," *Materials Science and Engineering A,* vol. 629, pp. 41-53, 2015.

[34] M. Zeren, "The Effect of Heat-Treatment on Aluminum-based Piston Alloys", *Materials and Design,* vol. 28, no. 9, pp. 2511-2517, 2007.

[35] H. Yang, S. Ji, Z. Fan, "Effect of Heat Treatment and Fe Content on The Microstructure and Mechanical Properties of Die-Cast Al-Si-Cu Alloys," *Materials and Design,* vol. 85, pp. 823-832, 2015.

[36] L.F. Wang, J. Sun, X. L. Yu, Y. Shi, X. G. Zhu, L. Y. Cheng, H. H. Liang, B. Yan, L. J. Guo, "Enhancement in Mechanical Properties of Selectively Laser-Melted AlSi10Mg Aluminum Alloys by T6-like Heat Treatment," *Materials Science and Engineering A,* vol. 734, pp. 299-310, 2018.

[37] O. E. Sebaie, A. M. Samuel, F. H. Samuel, H. W. Doty, "The Effects of Mischmetal, Cooling Rate and Heat Treatment on The Hardness of A319.1, A356.2 and A413.1 Al-Si Casting Alloys," *Materials Science and Engineering*

A, vol. 486, no. 1-2, pp. 241-252, 2008.

[38] M. Farokhpour, M. S. A. Parast, M. Azadi, “Evaluation of Hardness and Microstructural Features in Piston Aluminum-Silicon Alloys after Different Ageing Heat Treatments,” *Results in Materials*, vol. 16, pp. 100323, 2022.

[39] L.Y. Pio, "Effect of T6 Heat Treatment on the Mechanical Properties of Gravity Die Cast A356 Aluminium Alloy,” *Journal of Applied Sciences*, vol. 11, no. 11, pp. 2048-2052, 2011.

[40] V. Firouzdor, M. Rajabi, E. Nejati, F. Khomamizadeh, “Effect of Microstructural Constituents on The Thermal Fatigue Life of A319 Aluminum Alloy,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 454-455, pp. 528-535, 2007.

[41] K. Sasaki, T. Takahashi, “Low Cycle Thermal Fatigue and Microstructural Change of AC2B-T6 Aluminum Alloy,” *International Journal of Fatigue*, vol. 28, no. 3, pp. 203-210, 2006.

[42] A. Moffat, S. Barnes, B. Mellor, P. Reed, “The Effect of Silicon Content on Long Crack Fatigue Behaviour of Aluminium-Silicon Piston Alloys at Elevated Temperature,” *International Journal of Fatigue*, vol. 27, no. 10-12, pp. 1564-1570, 2005.

[43] S. H. Juang, L. J. Fan, H. P. O. Yang, “Influence of Preheating Temperatures and Adding Rates on Distributions of Fly Ash in Aluminum Matrix Composites Prepared by Stir Casting,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 16, no. 7, pp. 1321-1327, 2015.

[44] J. L. Cavazos, R. Colas, “Precipitation in A Heat-Treatable Aluminum Alloy Cooled at Different Rates,” *Materials Characterization*, vol. 47, no. 3-4, pp. 175-179, 2001.

[45] K. El-Menshawy, A. W. A. El-Sayed, M. E. El-Bedawy, H. A. Ahmed, S. M. El-Raghy, “Effect of Aging Time at Low Aging Temperatures on The Corrosion of Aluminum Alloy 6061,” *Corrosion Science*, vol. 54, pp. 167-173, 2012.

[46] S. Tabibian, E. Charkaluk, A. Constantinescu, G. Guillemot, F. Szmytka, “Influence of Process-Induced Microstructure on Hardness of Two Al-Si Alloys,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 646, pp. 190-200, 2015.

[47] F. Kamali, M. Azadi, “An Evaluation of Tribological and Mechanical Properties of Al-Si-Cu Alloy with Nano-Clay Particles Reinforcement,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 233, no. 19-20, pp. 7062-7076, 2019.

[48] Z. Qian, X. Liu, D. Zhao, G. Zhang, “Effects of Trace Mn Addition on The Elevated Temperature Tensile Strength and Microstructure of A Low-Iron Al-Si Piston Alloy,” *Materials Letters*, vol. 62, no. 14, pp. 2146-2149, 2008.

[49] M. Azadi, M. M. Shirazabad, “Heat Treatment Effect on Thermo-Mechanical Fatigue and Low Cycle Fatigue Behaviors of A356.0 Aluminum Alloy,” *Materials and Design*, vol. 45, pp. 279-285, 2013.

[50] S. Khisheh, M. Azadi, V. Z. Hendoabadi, M. S. A. Parast, G. Winter, B. Seisenbacher, F. Gruen, K. Khalili, “Influence of T6 Heat-Treating and Over-Ageing on Out-of-Phase Thermo-Mechanical Fatigue Behaviors of Al-Si-Cu Alloy,” *Materials Today Communications*, pp. 104803, 2022.

[51] S. Rezanezhad, M. Azadi, M. Azadi, “Influence of Heat Treatment on High-Cycle Fatigue and Fracture Behaviors of Piston Aluminum Alloy Under Fully-Reversed Cyclic Bending,” *Metals and Materials International*, vol. 27, no. 5, pp. 860-870, 2021.

[52] W. Shi, B. Gao, G. Tu, S. Li, Y. Hao, F. Yu, “Effect of Neodymium on Primary Silicon and Mechanical Properties

of Hypereutectic Al-15%Si alloy," *Journal of Rare Earths*, vol. 28, pp. 367-370, 2010.

[53] M. Azadi, S. Rezanezhad, M. Zolfaghari, M. Azadi, "Effect of Simultaneous Use of Silica Nanoparticles and Heat Treatment on High-Cycle Bending Fatigue Lifetime in Piston Aluminum Alloy," Modares Mechanical Engineering, vol. 20, no. 6, pp. 1463-1473, 2020, (In Persian).

[54] M. Garat, and G. Laslaz, *Improved Aluminium Alloys for Common Rail Diesel Cylinder Heads*, Engineering, 2007.

[55] J. Feng, B. Ye, L. Zuo, R. Qi, Q. Wang, H. Jiang, R. Huang, W. Ding, "Effects of Ni Content on Low Cycle Fatigue and Mechanical Properties of Al-12Si-0.9Cu-0.8Mg-xNi at 350°C," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 706, pp. 27-37, 2017.

[56] M. Zhu, Z. Jian, G. Yang, Y. Zhou, "Effects of T6 Heat Treatment on The Microstructure, Tensile Properties, and Fracture Behavior of The Modified A356 alloys," *Materials and Design*, vol. 36, pp. 243-249, 2012.

[57] M. Azadi, "Cyclic Thermo-Mechanical Stress, Strain and Continuum Damage Behaviors in Light Alloys during Fatigue Lifetime considering Heat Treatment Effect," *International Journal of Fatigue*, vol. 99, pp. 303-314, 2017.

[58] M. Azadi, H. Bahmanabadi, F. Gruen, G. Winter, B. Seisenbacher, "Cyclic Hardening/Softening Experimental Data in Nano-Clay-Composite and Aluminum Alloy under High-Temperature Strain-Controlled Loading," *Experimental Results*, vol. 3, pp. e6, 2022.

[59] E. Ogris, A. Wahlen, H. Lüchinger, P. Uggowitzer, "On The Silicon Spheroidization in Al-Si alloys," *Journal of Light Metals*, vol. 2, no. 4, pp. 263-269, 2002.

[60] D. Zhang, L. Zheng, D. St John, "Effect of A Short Solution Treatment Time on Microstructure and Mechanical Properties of Modified Al-7wt.%Si-0.3wt.%Mg alloy," *Journal of Light Metals*, vol. 2, no. 1, pp. 27-36, 2002.

[61] V. S. Krasnikov, A. E. Mayer, V. V. Pogorelko, M. R. Gazizov, "Influence of θ′ Phase Cutting on Precipitate Hardening of Al-Cu Alloy during Prolonged Plastic Deformation: Molecular Dynamics and Continuum Modeling," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 11, p. 4906, 2021.

[62] M. S. A. Parast, M. Azadi, "Effect of Nano-Clay Particles and Heat Treating on Pure and Fretting Fatigue Properties of Piston Aluminum Alloy under Stress-Controlled Cyclic Bending Loading," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 31, no. 7, pp. 5927-5942, 2022.

[63] P. Liu, J. Y. Hu, H. X. Li, S. Y. Sun, Y. B. Zhang, "Effect of Heat Treatment on Microstructure, Hardness and Corrosion Resistance of 7075 Al Alloys Fabricated by SLM," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 60, pp. 578-585, 2020.

[64] K. N. Obiekea, S. Y. Aku, D. S. Yawas, "Effects of Pressure on The Mechanical Properties and Microstructure of Die Cast Aluminum A380 alloy," *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, vol. 2, no. 03, pp. 248, 2014.

[65] S. J. S. Chelladurai, R. Arthanari, "Prediction of Hardness of Stir Cast LM13 Aluminum Alloy - Copper Coated Short Steel Fiber Reinforced Composites using Response Surface Methodology," *Materials Science and Engineering Technology*, vol. 51, no. 2, pp. 221-229, 2020.

[66] M. Azadi, M. S. A. Parast, "Data Analysis of High-Cycle Fatigue Testing on Piston Aluminum-Silicon Alloys under Various Conditions: Wear, Lubrication, Corrosion, Nano-Particles, Heat-Treating, and Stress," *Data in Brief*, vol. 41,

pp. 107984, 2022.

[67] S. I. Talabi, S. O. Adeosun, A. F. Alabi, I. N. Aremu, S. Abdulkareem, “Effects of Heat Treatment on the Mechanical Properties of Al-4% Ti Alloy,” *International Journal of Metals,* vol. 2013, pp. 127106, 2013.

[68] V. Gadpale, P. N. Banjare, M. K. Manoj, “Effect of Ageing Time and Temperature on Corrosion Behaviour of Aluminum Alloy 2014,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,* vol. 338, pp. 012008, 2018.

[69] E. F. A. Zeid, “Influence of Aging Temperature on Precipitation Kinetics, Morphology and Hardening Behavior of Al-7475 Alloy,” *Arabian Journal for Science and Engineering,* vol. 44, no. 7, pp. 6621-6629, 2019.

[70] J. Pezda, “Effect of Shortened Heat Treatment on The Hardness and Microstructure of 320.0 Aluminium Alloy,” *Archives of Foundry Engineering,* vol. 14, no. 2, pp. 27-30, 2014.

[71] N. Awad, H. Niu, U. Ali, Y. Morsi, T. Lin, “Electrospun Fibrous Scaffolds for Small-Diameter Blood Vessels: A Review,” *Membranes,* vol. 8, no. 1, p. 15, 2018.

[72] Z. Y. Li, X. L. Liu, G. Q. Wu, W. Sha, “Observation of Fretting Fatigue Cracks of Ti6Al4V Titanium Alloy,” *Materials Science and Engineering: A,* vol. 707, pp. 51-57, 2017.